

# **SIMULAÇÃO E ESTUDO PARAMÉTRICO DE FACHADAS DE DUPLA PELE UTILIZANDO O PROGRAMA DESIGNBUILDER**

**ANDRÉ FILIPE CAMPOS ALBERTO**

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de  
**MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM CONSTRUÇÕES**

---

Orientador: Professor Doutor Nuno Manuel Monteiro Ramos

JUNHO DE 2015

## **MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2014/2015**

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446



[miec@fe.up.pt](mailto:miec@fe.up.pt)

*Editado por*

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440



[feup@fe.up.pt](mailto:feup@fe.up.pt)



<http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2014/2015 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2015.*

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respetivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão eletrónica fornecida pelo respetivo Autor.

Aos meus Pais

*Men build too many walls and not enough bridges*

*Joseph Fort Newton / Georges Perec*



## **AGRADECIMENTOS**

Quero agradecer ao meu orientador, Professor Dr. Nuno Manuel Monteiro Ramos, desde logo por ter aceitado tão prontamente a minha proposta de tema de dissertação, pela disponibilidade e tempo despendido e por me ter ajudado a manter focado nos meus objetivos.

Aos meus amigos e colegas de curso que partilham comigo o sonho de ter sucesso na área da engenharia quero também deixar uma palavra de agradecimento. Ao Duarte, Luís e Márcio que tiveram um contributo fundamental no meu sucesso académico. À Carolina, Dolores, Emanuel, Filipa, Filipe, Raquel, Ricardo, Sara e Susana com quem partilhei tantas gargalhadas ao longo de todos aqueles jantares. Ao pessoal de construções que por algum motivo fez parte da minha vida ao longo deste último ano. A todos um grande obrigado e espero poder continuar a acompanhar o vosso percurso.

À Joana que esteve sempre do meu lado nestes últimos seis anos e com quem partilhei os bons e os maus momentos. Tu fazes da monogamia algo aceitável.

Por último e de forma mais marcada, quero agradecer aos meus pais, a quem dedico esta dissertação. Obrigado por todo o apoio que me deram ao longo destes cinco anos de curso, por terem acreditado em mim e pela aposta que fizeram na minha educação. Espero ser um orgulho para ambos.



## **RESUMO**

A fachada de um edifício tem uma grande influência na performance energética do mesmo. Isto é especialmente verdade quando se fala de edifícios com a envolvente exterior totalmente envidraçada. Este tipo de fachadas transparentes é cada vez mais comum nos dias de hoje, mas traz consigo uma série de desafios relacionados com o comportamento térmico das mesmas. Como tal, é importante a procura de soluções alternativas que garantam o conforto dos ocupantes e que sejam economicamente viáveis. As fachadas de dupla pele surgem para dar resposta a este desafio, com a promessa de melhorar a eficiência energética do edifício ao mesmo tempo que garantem os níveis de iluminação e uma estética semelhantes às fachadas de vidro tradicionais. O principal objetivo desta dissertação é avaliar a performance térmica de diferentes tipologias de fachadas de dupla pele através da análise dos consumos de energia para climatização do edifício.

A primeira parte deste trabalho consistiu na exploração do conceito de fachada de dupla pele, apresentação das diferentes tipologias existentes e explicação do seu respetivo funcionamento. De seguida, utilizou-se o programa DesignBuilder para modelar diferentes tipos de fachada e foram utilizadas as suas capacidades de simulação térmica em regime variável, de cálculo dos caudais de ventilação natural (Airflow Network) e de Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD), de modo a avaliar a performance térmica de cada um dos casos de estudo. Foram alteradas características intrínsecas ao tipo de fachada, como a geometria e o tipo de percurso do fluxo de ar na cavidade para analisar o consumo de energia de climatização de um edifício fictício situado na cidade do Porto (Portugal). De seguida, foi feita uma análise de sensibilidade ao ambiente interior e exterior e simulados edifícios inseridos em diferentes climas europeus.

Os resultados mostram que o comportamento térmico de uma fachada de dupla pele está muito dependente da sua geometria, do esquema de ventilação e especialmente das condições do ambiente exterior. É possível também concluir que a aplicação de uma fachada de dupla pele num edifício com características semelhantes ao simulado não traz vantagens do ponto de vista do consumo de energia para climatização. No entanto, esta tecnologia construtiva torna-se bastante interessante quando inserida em climas mais frios, como os do Norte da Europa.

**PALAVRAS-CHAVE:** fachada de dupla pele, simulação numérica, estudo paramétrico, DesignBuilder, Airflow Network.





## **ABSTRACT**

The facade of a building has a great influence on its energy performance. This is especially true when it comes to buildings with fully glazed outer envelope. This type of transparent facades is increasingly popular in this day and age, but brings with it a number of challenges related to its thermal behavior. As such, it is important to find alternative solutions that ensure the comfort of the users and that are economically viable. The double-skin facades arise to meet this challenge, with the promise of improving the energy efficiency of the building, while ensuring the lighting levels and a similar aesthetic associated with traditional glass facades. The main objective of this dissertation is to evaluate the thermal performance of different types of double-skin facades by analyzing the energy consumption of the heating and cooling systems of the building.

The first part of this essay consisted in the exploration the concept of double-skin facade, presentation of the different typologies and explanation of their respective operation. Then, it was used the *DesignBuilder software* to model various types of facade. Its thermal simulation capabilities, natural ventilation (Airflow Network) and Computational Fluid Dynamics (CFD) modes were used to evaluate the thermal performance of each case study. The type of facade, as the geometry and the type of airflow path in the cavity were changed in order to analyze the HVAC energy consumption of a fictional building located in Porto (Portugal). Then it was performed a sensitivity analysis of the internal and external environment and simulated buildings inserted in different European climates.

The results show that the thermal behavior of a double-skin facade is largely dependent on its geometry, ventilation and especially the conditions of the outside environment. It is also possible to conclude that the application of a double-skin facade on a building with similar characteristics to the simulated does not bring advantages from the energy consumption point of view. However, this constructive technology becomes quite interesting when applied in colder climates, such as northern Europe's.

**KEYWORDS:** double-skin facade, numerical simulation, parametric study, DesignBuilder, Airflow Network.



## ÍNDICE GERAL

<b>AGRADECIMENTOS</b> .....	i
<b>RESUMO</b> .....	iii
<b>ABSTRACT</b> .....	v
<b>ÍNDICE GERAL</b> .....	vii
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b> .....	xi
<b>ÍNDICE DE QUADROS</b> .....	xv
<b>ABREVIATURAS</b> .....	xvii
<b>SÍMBOLOS</b> .....	xvii

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	1
1.1. ENQUADRAMENTO .....	1
1.2. OBJETIVOS .....	2
1.3. DIVISÃO E ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO .....	2
<b>2. FACHADAS DE DUPLA PELE</b> .....	5
2.1. ENQUADRAMENTO .....	5
2.2. DESCRIÇÃO TÉCNICA .....	5
2.3. HISTÓRIA E EVOLUÇÃO .....	7
2.4. CLASSIFICAÇÃO .....	9
2.4.1 TIPO DE VENTILAÇÃO .....	9
2.4.1.1 Ventilação natural .....	10
2.4.1.2 Ventilação mecânica .....	10
2.4.1.3 Ventilação híbrida .....	11
2.4.2 GEOMETRIA DA FACHADA .....	11
2.4.2.1 Fachada Confinada (“Box window type”) .....	11
2.4.2.2 Fachada Corredor (“Corridor facade”) .....	12
2.4.2.3 Fachada Chaminé (“Shaft box type”) .....	13
2.4.2.4 Fachada Multi-Piso (“Multi-storey double skin facade”) .....	13
2.4.3 PERCURSO DO FLUXO DE AR NA CAVIDADE .....	14
2.4.3.1 Fachada Tampão (“Buffer zone”); .....	15
2.4.3.2 Fachada Cortina de Ar Exterior (“Outdoor air curtain”) .....	15

2.4.3.3 Fachada Cortina de Ar Interior (“Indoor air curtain”); .....	15
2.4.3.4 Fachada Admissão de Ar (“Air supply”) .....	15
2.4.3.5 Fachada Exaustão de Ar (“Air exhaust”) .....	15
<b>2.5. VANTAGENS E DESVANTAGENS</b> .....	16
<b>2.6. ESTUDOS ANTERIORES NO ÂMBITO DAS FDP</b> .....	18
<b>2.7. EXEMPLOS DE APLICAÇÃO EM PORTUGAL</b> .....	23
<b>2.8. SÍNTESE DO CAPÍTULO</b> .....	24

## **3. MODELAÇÃO NO DESIGNBUILDER** .....

<b>3.1. ENQUADRAMENTO</b> .....	25
<b>3.2. INTRODUÇÃO AO PROGRAMA DESIGNBUILDER</b> .....	25
3.2.1 DESIGNBUILDER .....	25
3.2.2 SIMULAÇÃO DE FACHADAS DE DUPLA PELE .....	26
3.2.3 DETALHES DE CÁLCULO .....	27
3.2.3.1 Balanço térmico interior .....	27
3.2.3.2 Transferência de calor através de uma FDP .....	28
3.2.3.3 Algoritmos de distribuição solar .....	31
3.2.3.4 Ventilação mecânica .....	32
3.2.3.5 Ventilação natural (Airflow Network) .....	33
3.2.3.6 Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD) .....	34
3.2.3.7 Análise Paramétrica .....	36
<b>3.3. CRIAÇÃO DO MODELO DE UMA FACHADA DE DUPLA PELE</b> .....	36
3.3.1 TIPOLOGIA .....	37
3.3.2 GEOMETRIA .....	37
3.3.3 MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO .....	40
3.3.4 AMBIENTE EXTERIOR .....	42
3.3.5 AMBIENTE INTERIOR .....	44
3.3.6 ABERTURAS .....	46
3.3.7 VENTILAÇÃO E SISTEMA DE AVAC .....	47
3.3.8 ILUMINAÇÃO .....	48
<b>3.4. TIPOS DE RESULTADOS</b> .....	48
3.4.1 POTÊNCIA DE AQUECIMENTO .....	49
3.4.2 POTÊNCIA DE ARREFECIMENTO .....	50

3.4.3 SIMULAÇÃO ANUAL.....	51
<b>3.5. SÍNTESE DO CAPÍTULO .....</b>	<b>53</b>

## **4. CENÁRIOS DE SIMULAÇÃO .....**

<b>4.1. ENQUADRAMENTO .....</b>	<b>55</b>
<b>4.2. MODELO BASE.....</b>	<b>55</b>
<b>4.3. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DAS FDP.....</b>	<b>56</b>
4.3.1 GEOMETRIA .....	56
4.3.2 PERCURSO DO FLUXO DE AR NA CAVIDADE .....	58
4.3.3 ESPESSURA DA CAVIDADE .....	59
4.3.4 ÁREA DAS GRELHAS DE VENTILAÇÃO .....	60
4.3.5 TIPO DE VIDRO.....	61
<b>4.4. INFLUÊNCIA DO AMBIENTE INTERIOR E EXTERIOR .....</b>	<b>63</b>
4.4.1 GANHOS INTERNOS .....	63
4.4.2 ORIENTAÇÃO DA FACHADA.....	64
4.4.3 CLIMA .....	65
4.4.4 NÚMERO DE FACHADAS ENVIDRAÇADAS .....	66
<b>4.5. SÍNTESE DO CAPÍTULO .....</b>	<b>67</b>

## **5. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS .....**

<b>5.1. ENQUADRAMENTO .....</b>	<b>69</b>
<b>5.2. MODELO BASE.....</b>	<b>69</b>
5.2.1 VARIAÇÃO DA TEMPERATURA INTERIOR .....	69
5.2.2 BALANÇO ENERGÉTICO ANUAL .....	70
5.2.3 BALANÇO ENERGÉTICO DIÁRIO.....	72
<b>5.3. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DAS FDP.....</b>	<b>74</b>
5.3.1 GEOMETRIA E TIPO DE PERCURSO DO FLUXO DE AR .....	74
5.3.2 ESPESSURA DA CAVIDADE .....	83
5.3.3 ÁREA DAS GRELHAS DE VENTILAÇÃO .....	87
5.3.4 TIPO DE VIDRO.....	91
<b>5.4. INFLUÊNCIA DO AMBIENTE INTERIOR E EXTERIOR .....</b>	<b>98</b>
5.4.1 GANHOS INTERNOS .....	98
5.4.2 ORIENTAÇÃO DA FACHADA.....	99

5.4.3 AJUSTE AO CLIMA .....	102
5.4.4 NÚMERO DE FACHADAS ENVIDRAÇADAS.....	103
<b>5.5. SÍNTESE DO CAPÍTULO .....</b>	<b>106</b>
 <b>6. CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS .....</b>	 <b>109</b>
<b>6.1. CONCLUSÕES GERAIS .....</b>	<b>109</b>
<b>6.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS .....</b>	<b>111</b>
 <b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	 <b>113</b>
 <b>ANEXOS.....</b>	 <b>a</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 2.1 – Esquema genérico da constituição de uma fachada de dupla pele [adaptado de Chan e Chow (2014)] .....	6
Fig. 2.2 – Esquema geral do funcionamento de uma fachada dupla pele (Single Aspect 2004) .....	6
Fig. 2.3 - Instalações industriais da empresa Steiff em 1904 (à esquerda) e em 2014 (à direita) (Goethe Institut 2014).....	7
Fig. 2.4 – Variação do preço do barril de petróleo ao longo dos últimos 70 anos [adaptado de Inflation Data (2015)].....	8
Fig. 2.5 – Evolução do número de edifícios com fachadas de dupla pele [adaptado de ECBCS e AAU (2008) e Streicher (2005)] .....	9
Fig. 2.6 – Esquema de ventilação natural de um edifício com FDP (Poirazis 2004) .....	10
Fig. 2.7 – Esquema de ventilação mecânica de uma FDP com reaproveitamento de ar para aquecimento da zona ocupada (Poirazis 2004).....	10
Fig. 2.8 – Diferentes tipos de geometria de fachadas de dupla pele (ECBCS e AAU 2008) .....	11
Fig. 2.9 – Geometria e esquema geral de ventilação de uma fachada do tipo “Confinada” (vista frontal – corte em perfil – corte horizontal) [adaptado de Oesterle, Lieb, e Green (2001)] .....	12
Fig. 2.10 – Geometria e esquema geral de ventilação de uma fachada do tipo “Corredor” (vista frontal – corte em perfil – corte horizontal) [adaptado de Oesterle, Lieb, e Green (2001)] .....	12
Fig. 2.11 – Geometria e esquema geral de ventilação de uma fachada do tipo “Chaminé” (vista frontal – corte em perfil – corte horizontal) [adaptado de Oesterle, Lieb, e Green (2001)] .....	13
Fig. 2.12 – Geometria e esquema geral de ventilação de uma fachada do tipo “Multi-Piso” (vista frontal – corte em perfil – corte horizontal) [adaptado de Oesterle, Lieb, e Green (2001)] .....	14
Fig. 2.13 – Esquematização dos diferentes tipos de percurso do fluxo de ar na cavidade de uma FDP .....	14
Fig. 2.14 – Variação da temperatura na cavidade de uma FDP com a velocidade do vento [adaptado de Gratia e De Herde (2007)].....	18
Fig. 2.15 - Experiência de propagação de fumo com modelo à escala (Ding e Hasemi 2006).....	19
Fig. 2.16 – Comparação das necessidades totais de arrefecimento entre uma fachada envidraçada simples e diferentes tipos de FDP para várias orientações [adaptado de Hamza (2008)].....	20
Fig. 2.17 – Energia necessária para a climatização de edifícios com FDP com diferentes espessuras da caixa de ar [adaptado de Kim, Schaefer, e Kim (2012)] .....	21
Fig. 2.18 – Variação da temperatura na fachada em função da dimensão das aberturas exteriores [adaptado de Gratia e De Herde (2007)].....	22
Fig. 2.19 – Edifício da Caixa Geral de Depósitos em Lisboa.....	23
Fig. 2.20 – Sede do grupo MSF Engenharia, S.A. em Lisboa (MSF Engenharia S.A. 2015) .....	23
Fig. 2.21 – Síntese dos aspetos relacionados com FDP apresentados no Capítulo 2.....	24
Fig. 3.1 – Interface de utilização do programa DesignBuilder v3.4 .....	26

Fig. 3.2 – Esquematização das variáveis consideradas para o balanço térmico no DesignBuilder [adaptado de Simões (2008)] .....	27
Fig. 3.3 – Esquematização das variáveis usadas no cálculo do balanço térmico de uma fachada de dupla pele ventilada [adaptado de DOE (2014)] .....	29
Fig. 3.4 – Projeção dos raios solares de acordo com o modelo “Full interior and exterior” (DOE 2014) .....	31
Fig. 3.5 – Esquematização das variáveis que influenciam o cálculo da radiação solar transmitida [adaptado de Marion e Wilcox (1995)].....	32
Fig. 3.6 – Separador “CFD Boundary Conditions Edit” .....	35
Fig. 3.7 – Criação de uma malha de nós para a análise CFD no DesignBuilder [adaptado de DesignBuilder (2013)] .....	35
Fig. 3.8 – Painel de edição do modo de análise paramétrica (à esquerda) e exemplo de resultados (à direita) .....	36
Fig. 3.9 – Hierarquia de elementos no programa DesignBuilder .....	37
Fig. 3.10 – Relação entre a extensão da fachada principal e a largura de edifícios com FDP .....	38
Fig. 3.11 – Método da sub-partição para a modelação de uma FDP no DesignBuilder .....	39
Fig. 3.12 – Método da união de blocos para a modelação de uma FDP no DesignBuilder .....	39
Fig. 3.13 – Representação 3D do modelo base de FDP modelado.....	40
Fig. 3.14 – Edição de materiais (à esquerda) e de elementos construtivos (à direita) no DesignBuilder .....	41
Fig. 3.15 – Variação anual da temperatura para o clima de Pedras Rubras, Porto .....	43
Fig. 3.16 – Velocidade média do vento para as várias orientações ao longo de um ano (à esquerda) e carta solar da cidade do Porto (à direita) .....	44
Fig. 3.17 – Edição de características do vidro (à esquerda) e de vidros duplos (à direita) no DesignBuilder .....	46
Fig. 3.18 – Exemplo de resultados da simulação de potência de aquecimento .....	50
Fig. 3.19 – Exemplo de resultados da simulação de potência de arrefecimento.....	51
Fig. 3.20 – Exemplo de resultados da simulação anual.....	52
Fig. 4.1 – Representação 3D do caso base modelado no DesignBuilder.....	55
Fig. 4.2 – Diferentes geometrias de fachada simuladas no DesignBuilder.....	57
Fig. 4.3 – Diferentes tipos de percurso do fluxo de ar na cavidade simulados no DesignBuilder .....	58
Fig. 4.4 – Diferentes espessuras da cavidade de ar simuladas no DesignBuilder .....	59
Fig. 4.5 – Diferentes áreas de grelhas de ventilação simuladas no DesignBuilder .....	61
Fig. 4.6 – Radiação solar incidente por metro quadrado (à esquerda) e velocidade média do vento (à direita) para os quatro pontos cardeais principais na cidade do Porto .....	64
Fig. 4.7 – Edifício com quatro fachadas envidraçadas simples (à esquerda) e modelo com quatro fachadas de dupla pele (à direita) .....	66



Fig. 5.1 – Variação das temperaturas exterior e interior ao longo de um ano típico .....	70
Fig. 5.2 – Balanço energético anual do modelo base .....	71
Fig. 5.3 – Ganhos internos e ganhos solares num dia típico de verão .....	73
Fig. 5.4 – Energia anual associada ao sistema de AVAC de edifícios com diferentes tipologias de FDP .....	74
Fig. 5.5 – Variação da temperatura média na caixa de ar de diferentes tipos de FDP durante um dia de inverno .....	75
Fig. 5.6 – Variação da temperatura média na caixa de ar de diferentes tipos de FDP durante um dia de verão .....	76
Fig. 5.7 – Ganhos solares anuais de edifícios com diferentes tipologias de FDP .....	77
Fig. 5.8 – Transferência de calor através do envidraçado de edifícios com diferentes tipologias de FDP .....	78
Fig. 5.9 – Caudal médio de ventilação da cavidade para diferentes tipologias de FDP .....	78
Fig. 5.10 – Relação entre a parcela de ventilação causada por efeito chaminé e por ação do vento em fachadas do tipo Cortina de Ar Exterior (CAE) .....	79
Fig. 5.11 – Resultados da análise CFD das quatro geometrias de fachada de dupla pele simuladas .....	80
Fig. 5.12 – Resultados da análise CFD dos cinco tipos de percurso do fluxo de ar diferentes simulados .....	81
Fig. 5.13 – Energia anual associada ao sistema de AVAC de edifícios com FDP com diferentes espessuras da cavidade .....	83
Fig. 5.14 – Caudal médio de ventilação da cavidade para FDP com diferentes espessuras da caixa de ar .....	84
Fig. 5.15 – Temperatura média, mínima e máxima atingida no interior de FDP com diferentes espessuras da caixa de ar .....	85
Fig. 5.16 – Resultados da análise CFD de diferentes espessuras da cavidade de uma FDP .....	86
Fig. 5.17 – Energia anual associada ao sistema de AVAC de edifícios com FDP com diferentes áreas de grelhas de ventilação (à esquerda) e transferência de calor anual através do envidraçado interior (à direita) .....	87
Fig. 5.18 – Variação do caudal médio de ventilação da cavidade em função da área das grelhas das aberturas na fachada .....	88
Fig. 5.19 – Variação das necessidades anuais de climatização do edifício em função do caudal médio de ventilação da cavidade para fachadas CAE (à esquerda) e CAI (à direita) .....	89
Fig. 5.20 – Resultados da análise CFD de diferentes áreas de grelha de ventilação de uma FDP .....	90
Fig. 5.21 – Consumo de energia associado a FDP do tipo Tampão, durante uma semana de inverno .....	92
Fig. 5.22 – Consumo de energia associado a FDP do tipo Tampão, durante uma semana de verão .....	92
Fig. 5.23 – Consumo de energia associado a FDP do tipo CAE, durante uma semana de inverno .....	93
Fig. 5.24 – Consumo de energia associado a FDP do tipo CAE, durante uma semana de verão .....	93

Fig. 5.25 – Consumo de energia associado a FDP do tipo CAI, durante uma semana de inverno.....	94
Fig. 5.26 – Consumo de energia associado a FDP do tipo CAI, durante uma semana de verão .....	94
Fig. 5.27 – Variação da temperatura no interior da cavidade de uma fachada do tipo Tampão para várias combinações de vidro diferentes .....	96
Fig. 5.28 – Variação da temperatura no interior da cavidade de uma fachada do tipo Cortina de Ar Exterior para várias combinações de vidro diferentes .....	96
Fig. 5.29 – Variação da temperatura no interior da cavidade de uma fachada do tipo Cortina de Ar Interior para várias combinações de vidro diferentes.....	96
Fig. 5.30 – Energia anual associada ao sistema de AVAC de edifícios com diferentes níveis de ganhos internos .....	98
Fig. 5.31 – Energia anual associada ao sistema de AVAC de um edifício para diferentes orientações da FDP.....	100
Fig. 5.32 – Ganhos solares de um edifício para diferentes orientações da FDP.....	100
Fig. 5.33 – Caudal médio de ventilação da cavidade para diferentes orientações da FDP .....	101
Fig. 5.34 – Energia anual associada ao sistema de AVAC de edifícios com FDP localizados em diferentes cidades europeias.....	102
Fig. 5.35 – Transferência de calor através do envidraçado de edifícios com FDP localizados em diferentes cidades europeias.....	103
Fig. 5.36 – Balanço energético anual de um edifício com quatro fachadas envidraçadas simples....	104
Fig. 5.37 – Balanço energético anual de edifícios com quatro fachadas de dupla pele .....	104

## **ÍNDICE DE QUADROS**

Quadro 2.1 – Diferentes tipos de classificação de fachadas de dupla pele .....	9
Quadro 3.1 – Características da envolvente opaca do modelo base .....	42
Quadro 3.2 – Características da localização selecionada para o modelo base .....	43
Quadro 3.3 – Distribuição da taxa de ocupação do edifício ao longo de um dia.....	45
Quadro 3.4 – Características dos envidraçados da FDP do modelo base .....	47
Quadro 3.5 – Síntese das características definidas para o modelo base .....	53
Quadro 4.1 – Diferentes áreas de grelha simuladas.....	60
Quadro 4.2 – Propriedades dos diferentes tipos de vidro usados na análise de sensibilidade .....	62
Quadro 4.3 – Resumo dos ganhos internos considerados em cada cenário de simulação.....	63
Quadro 4.4 – Condições climáticas das três localizações em estudo .....	65
Quadro 4.5 – Síntese dos diferentes cenários simulados .....	67
Quadro 5.1 – Resumo das combinações de tipos de envidraçados mais eficientes.....	95
Quadro 5.2 – Resumo das combinações de tipos de envidraçados menos eficientes .....	95
Quadro 5.3 – Taxa de variação das necessidades de climatização das diferentes FDP relativamente ao caso base .....	99
Quadro 5.4 – Síntese das conclusões retiradas dos diferentes cenários simulados .....	106



## **ABREVIATURAS**

AA – Admissão de Ar  
AVAC – Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado  
CAE – Cortina de Ar Exterior  
CAI – Cortina de Ar Interior  
Cav – Cavidade  
CB – Caso Base  
e.g. – Por exemplo  
etc. – et cetera  
EA – Exaustão de Ar  
FDP – Fachada de Dupla Pele  
Int – Zona interior  
Ref. – Referência  
Rph – Número de renovações horárias do ar interior  
Tp – Tampão

## **SÍMBOLOS**

$A_{abertura}$  – Área da abertura [ $m^2$ ]  
 $A_{abertura}$  – Área da abertura [ $m^2$ ]  
 $A_i$  – Área da superfície i [ $m^2$ ]  
 $A_{Comp}$  – Área do compartimento [ $m^2$ ]  
 $C_d$  – Coeficiente de descarga da abertura [–]  
 $C_p$  – Calor específico do ar da zona [J/kg.K]  
 $C_T$  – Fator de ponderação da transferência de calor sensível [ $K/m^3$ ]  
 $C_v$  – Coeficiente de pressão do vento [–]  
CMO – Caudal mínimo por ocupante [(l/s)/pessoa]  
 $E_{ext}$ ,  $E_{int}$  – Radiação de onda longa (exterior/interior) incidente na fachada [ $W/m^2$ ]  
 $g$  – Aceleração gravítica [ $m/s^2$ ]  
 $g_{\perp}$  – Fator solar do vão envidraçado [–]  
 $H$  – Altura do envidraçado (m)  
 $H'$  – Distância do ponto médio da abertura relativamente ao eixo neutro [m]

- $H_0$  – Altura característica (m)
- $h_{cv}$  – Coeficiente de transmissão térmica por convecção na cavidade [W/m<sup>2</sup>.K]
- $h_{ext}$ ,  $h_{int}$  – Coeficiente de transmissão térmica por convecção no exterior/interior [W/m<sup>2</sup>.K]
- $h_i$  – Coeficiente de transmissão térmica por convecção da superfície i [W/m<sup>2</sup>.K]
- $I_{difusa}$  – Intensidade da radiação solar difusa [W/m<sup>2</sup>]
- $I_{direta}$  – Intensidade da radiação solar direta [W/m<sup>2</sup>]
- $I_{refletida}$  – Intensidade da radiação solar difusa refletida pelo solo [W/m<sup>2</sup>]
- $k_i$  – Condutância do envidraçado i [W/m<sup>2</sup>.K]
- Ocup – Número de ocupantes por metro quadrado [pessoas/m<sup>2</sup>]
- $Q_{chaminé}$  – Caudal provocado pelo efeito chaminé [m<sup>3</sup>/s]
- $Q_{ventilação}$  – Caudal a ventilar [l/s]
- $Q_{vento}$  – Caudal provocado pela ação do vento [m<sup>3</sup>/s]
- $R_i$  – Radiação (de onda longa e de onda curta) absorvida pela face i [W/m<sup>2</sup>]
- $R_{solar}$  – Radiação solar transmitida [W/m<sup>2</sup>]
- $S$  – Área total do envidraçado [W/m<sup>2</sup>]
- $s$  – Espessura da cavidade [m]
- $S_s$  – Área do envidraçado efetiva coletora de radiação solar [m<sup>2</sup>]
- $T_{\infty}$  – Temperatura do ar infiltrado [K]
- $T_{cav}$  – Temperatura média do ar na cavidade ventilada [K]
- $T_{ext}$ ,  $T_{int}$ ,  $T_{cav}$  – Temperatura do ar na zona exterior, interior e da cavidade [K]
- $T_{si}$  – Temperatura da superfície i [K]
- $T_z$  – Temperatura do ar na zona simulada [K]
- $T_{zi}$  – Temperatura do ar na zona vizinha i [K]
- $v$  – Velocidade do vento [m/s]
- $v_{cav}$  – Velocidade média de circulação do ar na cavidade [m/s]
- $\dot{Q}_i$  – Ganhos internos por convecção [W]
- $\dot{Q}_{sist}$  – Troca de calor entre o ar interior da zona e o sistema de climatização [W]
- $\beta$  – Ângulo de incidência dos raios solares [rad]
- $\gamma$  – Ângulo entre a superfície do envidraçado e o céu [rad]
- $\delta$  – Ângulo entre a superfície do envidraçado e o solo [rad]
- $\varepsilon_i$  – Emissividade da face i [–]
- $\theta_{ext}$  – Temperatura do ar exterior [°C]
- $\theta_i$  – Temperatura superficial da face i [K]

$\theta_{\text{int}}$  – Temperatura do ar interior [°C]

$\rho_{\text{ar}}$  – Densidade do ar [kg/m<sup>3</sup>]

$\sigma$  – Constante de Stefan-Boltzmann [W/m<sup>2</sup>.K<sup>4</sup>]









# 1

## INTRODUÇÃO

### 1.1. ENQUADRAMENTO

A fachada de um edifício, para além de estabelecer a separação física entre o ambiente exterior e interior, tem também uma grande influência na quantificação das necessidades de consumo de energia para aquecimento e arrefecimento (Bauer, Möhle, e Schwarz 2009). Para além disso, a renovação de ar do espaço interior, o isolamento sonoro a ruídos aéreos provenientes do exterior e o aspeto estético geral do edifício estão também intrinsecamente relacionados com a qualidade da sua envolvente. A eficiência de uma fachada está diretamente associada à sua capacidade de reduzir os impactos ambientais associados à utilização do edifício, através da diminuição das necessidades de climatização, sem nunca pôr em causa o conforto dos ocupantes.

A configuração de uma fachada deve ser especificamente adaptada ao tipo de edifício que se pretende construir e ao meio em que este se encontra inserido. A localização, o clima e o tipo de utilização de um edifício são alguns dos fatores que o caracterizam. Edifícios com diferentes características implicam tipologias de fachadas distintas, o que se reflete no seu aspeto, modo de funcionamento e nas tecnologias construtivas e materiais utilizados (Crosby et al. 2008). A inexistência de uma estratégia adequada no projeto da fachada de um edifício pode conduzir a um consumo de energia muito elevado. Isto é especialmente perceptível no caso de construções com grandes vãos envidraçados, em que as trocas de calor pela envolvente e os ganhos solares têm uma grande influência no balanço energético do edifício.

A preocupação crescente com a utilização da energia de uma forma sustentável nas últimas décadas conduziu a uma grande evolução da eficiência energética dos edifícios (Brophy e Lewis 2011). Como tal, torna-se imprescindível o desenvolvimento de novas soluções construtivas que permitam uma redução dos consumos de energia para a climatização dos espaços e que garantam o conforto dos seus utilizadores.

As fachadas de dupla pele (ou “double-skin facades”, como são mencionadas na literatura inglesa) surgem assim como uma alternativa à fachada envidraçada simples tradicional, na tentativa de melhorar o comportamento higrotérmico dos edifícios e de diminuir os consumos de energia a estes associados.

## 1.2. OBJETIVOS

A presente dissertação tem como objetivos principais a avaliação das consequências da aplicação de uma fachada de dupla pele (FDP) nas necessidades de energia para climatização de um edifício e a análise da adequabilidade deste tipo de elemento construtivo em diferentes zonas climáticas. De modo a alcançar estes objetivos, estabeleceram-se as seguintes metas parciais a ser cumpridas:

- Compreensão do conceito de fachada de dupla pele: perceber o conceito geral de fachada de dupla pele; saber identificar as diferentes tipologias existentes e compreender o seu modo de funcionamento; conhecer as diferentes vantagens e desvantagens associadas a este elemento; analisar o estado da arte através da leitura de artigos científicos e provas académicas focadas nesta área;
- Domínio do *software* de simulação térmica DesignBuilder: conhecer o método de cálculo utilizado pelo programa; saber desconstruir o processo de simulação numérica e identificar as principais variáveis e equações de cálculo; conhecer as potencialidades e limitações do programa no que diz respeito à simulação de fachadas de dupla pele; dominar modos de simulação avançada, como o “Airflow Network” e o “Computational Fluid Dynamics”;
- Definição de um modelo base de simulação: selecionar a tipologia construtiva, as características geométricas e os materiais dos diferentes elementos construtivos a atribuir ao edifício a simular; definir os parâmetros característicos do caso de estudo com base em bibliografia técnica (ganhos internos, características do sistema de AVAC, etc.);
- Criação de diferentes modelos de fachadas de dupla pele: modelação da zona interior com as características atribuídas ao modelo base; criação e personalização da zona da cavidade das diferentes tipologias de FDP; criação das superfícies envidraçadas e introdução das grelhas de ventilação;
- Definição dos diferentes cenários a simular: selecionar as diferentes tipologias de fachada a ser estudadas; identificar as condições do ambiente exterior de maior interesse para o estudo paramétrico;
- Organização e apresentação dos resultados: selecionar os dados de saída do programa que têm interesse em ser analisados e a partir dos quais é possível tirar conclusões concretas; avaliar a melhor forma de organizar e apresentar os resultados das diferentes simulações, de modo a tornar mais simples e apelativa a leitura e compreensão geral da dissertação;
- Discussão crítica dos resultados obtidos: estabelecer relações causa e efeito entre as alterações feitas ao caso base e os dados de saída das diferentes simulações; explorar a ligação existente entre diferentes parâmetros calculados (dentro do mesmo caso de estudo e entre simulações distintas); analisar a variação das diferentes componentes do balanço energético e compreender como é que estas estão relacionadas com a performance térmica do edifício.

## 1.3. DIVISÃO E ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

A presente dissertação foi estruturada em seis capítulos:

- No Capítulo 1 procede-se ao enquadramento do tema, definição dos objetivos e indicação da organização da tese;
- No Capítulo 2 aborda-se o conceito de fachada de dupla pele, sendo apresentada a sua descrição técnica, evolução histórica e diferentes tipologias. São analisadas as vantagens e desvantagens relacionadas com este elemento construtivo e apresentados alguns edifícios em Portugal com este tipo de fachada;

- No Capítulo 3 é apresentado o programa de simulação térmica DesignBuilder e discutido o seu método de cálculo. Para além disso define-se o modelo base de simulação e é descrito passo a passo o processo de modelação de uma fachada de dupla pele;
- No Capítulo 4 enumeram-se os diferentes cenários de simulação, são explicadas as alterações feitas ao nível do modelo base de modo a simular as diferentes tipologias de fachada no DesignBuilder e são apontados os diferentes parâmetros de cálculo que são alterados em cada simulação e as variáveis do balanço energético que serão escrutinadas na discussão dos resultados;
- No Capítulo 5 são apresentados e discutidos os resultados extraídos do DesignBuilder relativamente ao comportamento do modelo base, das diferentes tipologias de fachada de dupla pele analisadas e da influência do ambiente exterior;
- No Capítulo 6 são apresentadas as conclusões do presente trabalho e sugeridos possíveis temas para desenvolvimentos futuros.



# 2

## FACHADAS DE DUPLA PELE

### 2.1. ENQUADRAMENTO

No presente capítulo será explorado o conceito de fachada de dupla pele. Será feita uma descrição técnica deste elemento construtivo, seguida de uma análise da sua evolução histórica e apresentação das diferentes tipologias existentes. Por fim, serão estudadas as vantagens e desvantagens relacionadas com este tipo de elemento e apresentados alguns edifícios em Portugal com este tipo de fachada. O principal objetivo deste capítulo é obter os conhecimentos necessários acerca do funcionamento das diferentes tipologias de fachadas de dupla pele, de modo a ser possível explorar de forma correta estes elementos nos capítulos seguintes.

### 2.2. DESCRIÇÃO TÉCNICA

As fachadas de dupla pele (FDP) são elementos construtivos compostos por dois vãos envidraçados com uma cavidade central que pode servir de caixa de ar selada ou destinar-se à circulação de ar responsável pela manutenção da temperatura da fachada. O caso mais comum de fachada de dupla pele é o de uma fachada ventilada na qual a renovação de ar da cavidade ocorre de forma natural ou é forçada com recurso a meios mecânicos.

A fachada exterior deve possuir um vidro laminado de elevada resistência que normalmente abrange a totalidade do edifício e é suportada com apoios metálicos que fazem a ligação à estrutura do edifício. Esta envolvente pode ser hermeticamente fechada ou aberta, com dispositivos de amissão e de exaustão de ar que são controlados manualmente ou de forma automática. A fachada interior pode, ou não, ser totalmente envidraçada e é nela que estão dispostas as janelas do edifício e onde há a possibilidade de instalar equipamentos de ventilação mecânica ou de climatização (no caso de uma fachada interior parcialmente opaca). No caso de cavidades ventiladas a partir de ar exterior, o envidraçado com maior capacidade de isolamento térmico deve ser colocado na pele interior do edifício. No caso contrário, em que a cavidade é ventilada com ar proveniente do interior, o vidro com o menor coeficiente de transmissão térmica ( $U$ ) deve ser colocado na face exterior da fachada (Poirazis 2004). No espaço intermédio compreendido entre os dois envidraçados (que pode ter desde alguns centímetros até poucos metros de espessura) encontram-se instalados os dispositivos de sombreamento (manuais ou automáticos) que, desta forma, estão protegidos do ambiental exterior.

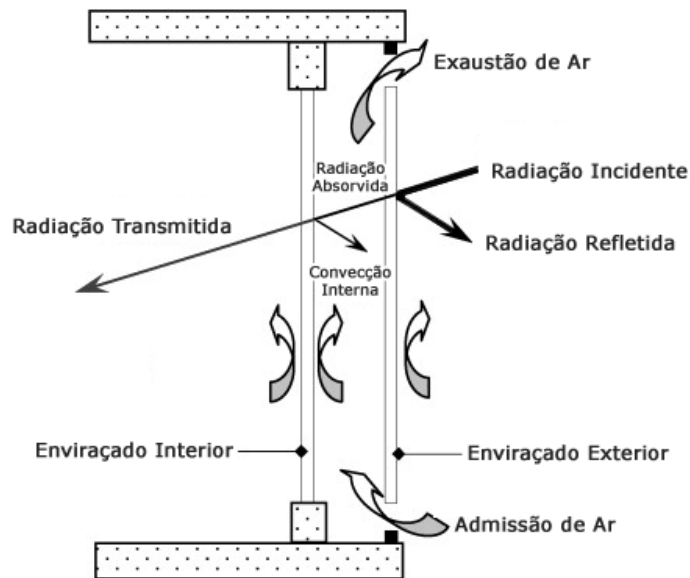


Fig. 2.1 – Esquema genérico da constituição de uma fachada de dupla pele [adaptado de Chan e Chow (2014)]

O funcionamento de uma fachada de dupla pele genérica está esquematizado na Fig. 2.1. O envidraçado exterior reflete parte da radiação solar incidente à semelhança do que acontece nos edifícios com fachada simples. Dentro do espaço de ar confinado, o ar aquece devido às reflexões da radiação e às trocas convectivas de calor que acontecem entre os dois vãos envidraçados (Loncour et al. 2004). Este ar aquecido torna-se menos denso, subindo pela fachada através do efeito chaminé. A ação do vento sobre o edifício causa uma sobrepressão na sua base e uma subpressão no topo, contribuindo também para a renovação do ar na cavidade – ver Fig. 2.2. Durante os meses de verão, o ar quente presente na cavidade de ar é extraído por ventilação natural ou mecânica de modo a que haja uma menor transmissão de calor para o interior. Durante a estação de aquecimento, o ar quente na caixa de ar pode ser recuperado por instalações mecânicas e reencaminhado para o interior do edifício para a climatização do mesmo.

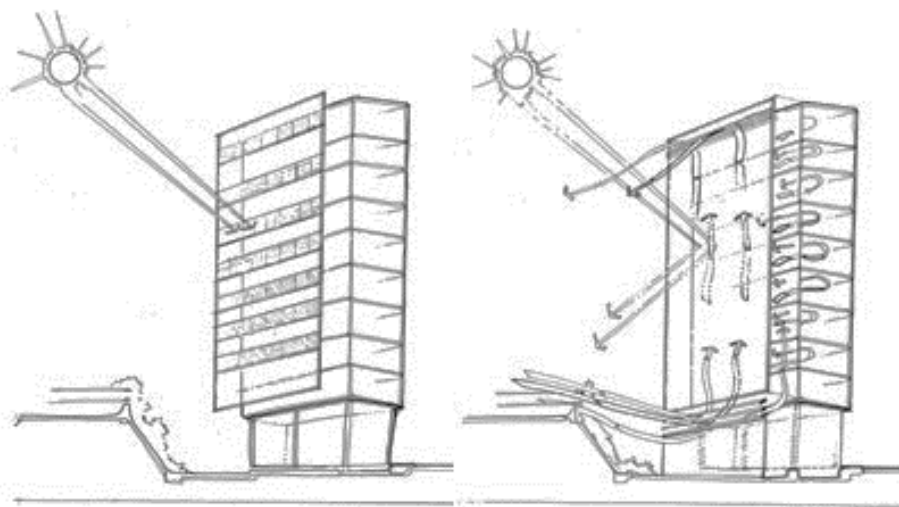


Fig. 2.2 – Esquema geral do funcionamento de uma fachada dupla pele (Single Aspect 2004)



### 2.3. HISTÓRIA E EVOLUÇÃO

O primeiro conceito relacionado com uma fachada de dupla pele foi descrito em 1849 por Jean-Baptiste Jobard que, enquanto diretor do Museu de Bruxelas, idealizou um componente constituído por dois vãos envidraçados, cuja cavidade seria ventilada mecanicamente. O espaço de ar intermédio deveria ser atravessado por ar quente no inverno e por ar fresco no verão, tendo em vista a climatização do espaço interior (Saelens, Carmeliet, e Hens 2002).

O primeiro registo de um edifício que tenha incorporado na sua envolvente uma fachada de dupla pele surge nas instalações industriais da Steiff, em Giengen an der Brenz, na Alemanha – ver Fig. 2.3. Esta empresa de brinquedos para crianças decidiu, em 1903, adotar esta tecnologia numa das suas fábricas com o objetivo de aproveitar ao máximo a luz solar para iluminação natural (Poirazis 2004). Esta instalação foi um sucesso, tendo o edifício sido expandido com o mesmo modelo de fachada e mantendo-se em funcionamento até aos dias de hoje (Goethe Institut 2014).

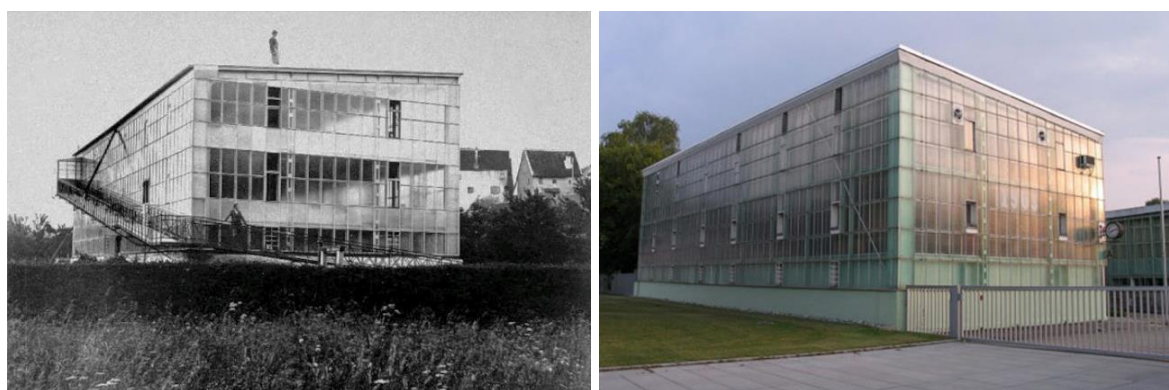


Fig. 2.3 - Instalações industriais da empresa Steiff em 1904 (à esquerda) e em 2014 (à direita) (Goethe Institut 2014)

Em 1928, o arquiteto soviético Moisei Ginzburg implementou uma fachada de dupla pele na zona comum destinada às refeições do bloco de apartamentos “Novinsky Boulevard”, no centro de Moscovo (Uttu 2001). Também em Moscovo, na mesma época, Le Corbusier idealizou o conceito de parede neutralizante (“mur neutralisant”) (Bryan 1991), que consistia em introduzir tubagens para aquecimento e arrefecimento do ar entre duas camadas de vidro. Segundo Le Corbusier, a circulação de ar à temperatura ambiente interior na cavidade da fachada faria com que deixassem de existir por completo transmissões de calor entre o edifício e o exterior. No entanto, este modelo de fachada nunca foi posto em prática pois era considerado demasiado dispendioso e pouco eficiente.

Durante as décadas seguintes não se verificou uma difusão da utilização deste tipo de fachadas, sendo escassos os registos de edifícios construídos com recurso a fachadas de dupla pele. No entanto, o desenvolvimento da indústria do vidro, com a massificação da utilização do vidro duplo nos anos 50, contribuiu em grande escala para a multiplicação das fachadas totalmente envidraçadas (Balkow 1999). Mais tarde, a introdução de gases mais pesados e com uma condutibilidade térmica baixa (como argon, kriptón e xénon) entre os dois vidros e o surgimento de vidros de baixa emissividade veio contribuir para a massificação da utilização do vidro na construção.

A desregulamentação do sistema monetário internacional e os choques petrolíferos (em 1973 e 1979), que deram origem a uma crise económica mundial no fim dos anos 70, vieram fazer reequacionar formas de evitar o consumo excessivo de energia – ver Fig. 2.4. Assim, a utilização de fachadas de dupla pele voltou a destacar-se com base em preocupações ambientais e pelo aspeto estético geral que conferia ao edificado, verificando-se um crescimento acelerado do número de edifícios com FDP ao longo das décadas seguintes (Streicher 2005).

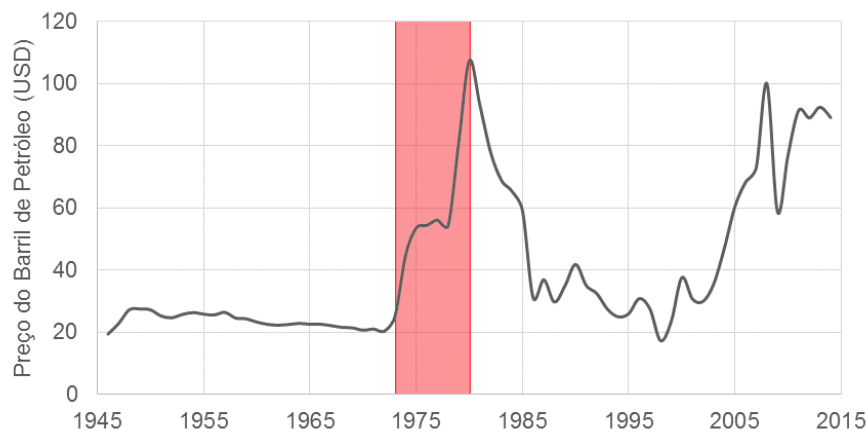


Fig. 2.4 – Variação do preço do barril de petróleo ao longo dos últimos 70 anos [adaptado de Inflation Data (2015)]

A partir da década de 90, os edifícios corporativos totalmente envidraçados tornaram-se uma tendência arquitetónica, dando às construções um estilo moderno e associando às empresas neles sediadas uma imagem de transparência para com o público (Streicher 2005). O aumento contínuo do preço da energia e a preocupação em “ser-se verde” levou muitas empresas a optar por um tipo de fachada envidraçada energeticamente mais eficiente. As fachadas de dupla pele acabaram por ficar associadas a este tipo de construção sustentável, conferindo uma imagem de responsabilidade ambiental às empresas (Crosby et al. 2008). Para além disso, o desenvolvimento de programas informáticos de simulação e cálculo tornou possível a engenheiros e arquitetos dimensionar fachadas de dupla pele mais complexas e de uma forma mais fiável.

A Fig. 2.5 ilustra a evolução do número de edifícios construídos com fachada de dupla pele a partir dos anos 60. Esta listagem é constituída por edifícios localizados principalmente na Europa, América do Norte, Japão e Austrália e foi concebida com base nos dados do “EBCBS -Annex 44” (ECBCS e AAU 2008) e em artigos científicos publicados no âmbito do projeto Bestfacade (Streicher 2005).

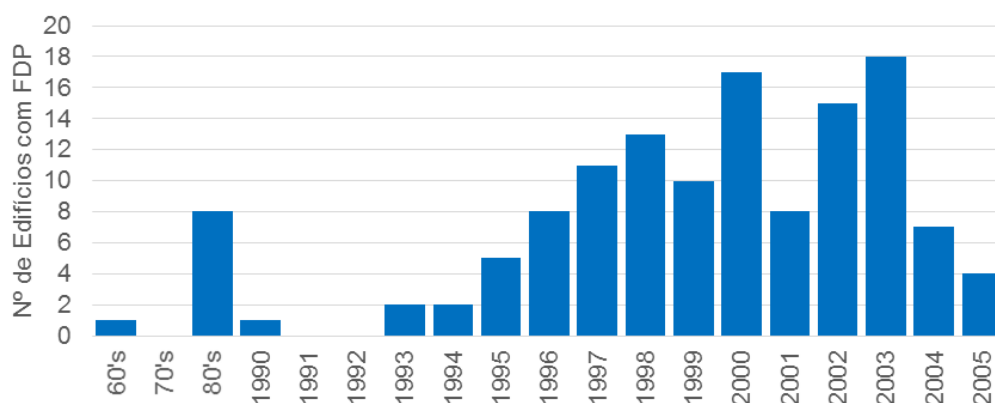


Fig. 2.5 – Evolução do número de edifícios com fachadas de dupla pele [adaptado de ECBCS e AAU (2008) e Streicher (2005)]

## 2.4. CLASSIFICAÇÃO

As fachadas de dupla pele são um elemento construtivo bastante complexo, podendo apresentar várias tipologias distintas – ver Quadro 2.1. De modo a classificar este tipo de fachadas, estas foram agrupadas segundo a bibliografia estudada (Loncour et al. 2004) com base em três parâmetros gerais:

- Tipo de ventilação;
- Geometria da cavidade;
- Percurso do fluxo de ar na cavidade.

Dentro desta lista é ainda possível caracterizá-las a partir de fatores secundários, como a espessura da cavidade, a extensão em altura da fachada ou o facto de as entradas de ar serem ou não automatizadas.

Quadro 2.1 – Diferentes tipos de classificação de fachadas de dupla pele

Tipo de ventilação	Natural		Mecânica		Híbrida	
Geometria da cavidade	Confinada	Corredor		Chaminé	Multi-Piso	
Percurso do fluxo de ar	Tampão	Cortina de Ar Exterior	Cortina de Ar Interior	Admissão de Ar	Exaustão de Ar	

### 2.4.1 TIPO DE VENTILAÇÃO

O tipo de ventilação diz respeito ao tipo de força que faz circular o ar dentro do canal compreendido entre a fachada exterior e o envidraçado interior. Este fenómeno pode ocorrer de três formas distintas:

- Ventilação natural;
- Ventilação mecânica;
- Ventilação híbrida.

#### 2.4.1.1 Ventilação natural

A ventilação natural é resultado da diferença de pressão entre o ar aquecido e o ar frio – efeito chaminé. O ar quente (menos denso que o ar frio) tende a subir pela fachada, escapando pelo topo desta. A ação do vento pode também contribuir para a ventilação natural, criando uma pressão positiva na base da fachada e uma subpressão no topo do edifício – ver Fig. 2.6.

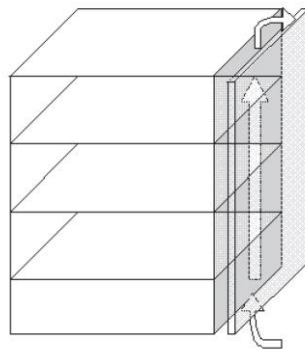


Fig. 2.6 – Esquema de ventilação natural de um edifício com FDP (Poirazis 2004)

#### 2.4.1.2 Ventilação mecânica

Na ventilação mecânica (ou forçada) a circulação do ar é causada por uma diferença de pressão induzida por equipamentos específicos, como ventiladores. Ao contrário do que acontece com a ventilação natural, o sentido de circulação do ar não é obrigatoriamente ascensional, podendo em alguns casos o fluxo de ar deslocar-se de cima para baixo. Durante o inverno é ainda possível utilizar o ar de exaustão da FDP para climatizar o ambiente interior. O ar que é expelido pela fachada é pré-aquecido à medida que a percorre ascendentemente, existindo vantagens no seu aproveitamento para aquecer a zona ocupada, no caso de edifícios com um sistema de ventilação mecânica coletivo (Stec, Van Paassen, e Maziarz 2005) – ver Fig. 2.7.

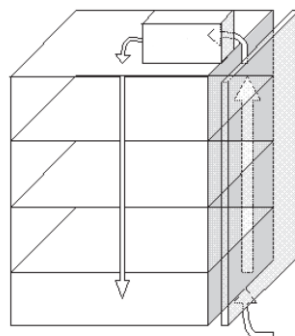


Fig. 2.7 – Esquema de ventilação mecânica de uma FDP com reaproveitamento de ar para aquecimento da zona ocupada (Poirazis 2004)

### 2.4.1.3 Ventilação híbrida

Para a ventilação híbrida são usados meios mecânicos como apoio à ventilação natural, que deve ser usada tanto quanto possível de forma a diminuir o consumo de energia. A ventilação mecânica apenas é ativada quando as diferenças de pressão e velocidade do vento são insuficientes para garantir o funcionamento desejado da fachada. A ativação da ventilação secundária é gerida por um sistema de controlo automatizado que se socorre de sensores para avaliar a temperatura e qualidade do ar na fachada e no espaço interior (Stec, Van Paassen, e Maziarz 2005).

### 2.4.2 GEOMETRIA DA FACHADA

A geometria das fachadas de dupla pele é muito variada, sendo possível encontrar várias tipologias diferentes – ver Fig. 2.8. A bibliografia (Oesterle, Lieb, e Green 2001) engloba todos estes casos em quatro grupos distintos:

- Confinada (“Box window type”);
- Corredor (“Corridor facade”);
- Chaminé (“Shaft box type”);
- Multi-Piso (“Multi-storey double skin facade”).

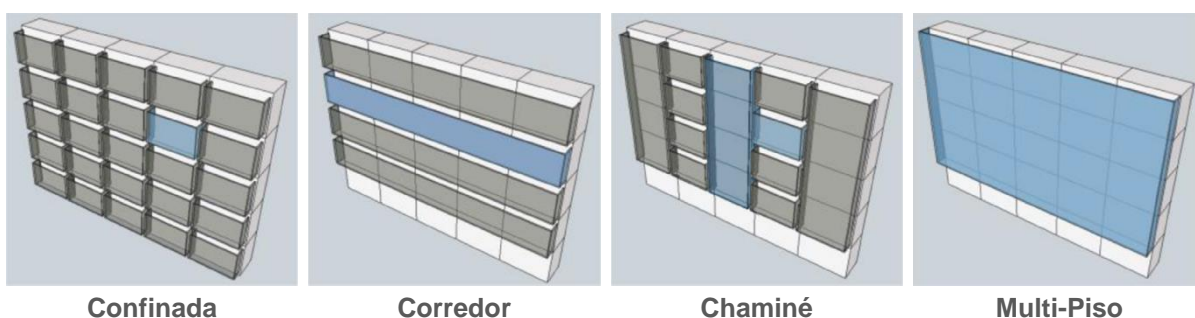


Fig. 2.8 – Diferentes tipos de geometria de fachadas de dupla pele (ECBCS e AAU 2008)

#### 2.4.2.1 Fachada Confinada (“Box window type”)

As fachadas do tipo Confinada encontram-se divididas em pequenos módulos individuais, funcionando de forma semelhante a uma janela dupla – ver Fig. 2.9. Cada componente, ou “caixa”, tem a altura máxima de um piso, podendo existir mais do que uma “caixa” disposta horizontalmente por compartimento. Este tipo de fachada é especialmente interessante nos casos em que se pretende diminuir a transmissão de ruído entre compartimentos e entre pisos. No caso de os diferentes blocos possuírem dimensões reduzidas, é possível a sua pré-fabricação, o que agiliza a sua implementação na obra (Loncour et al. 2004).

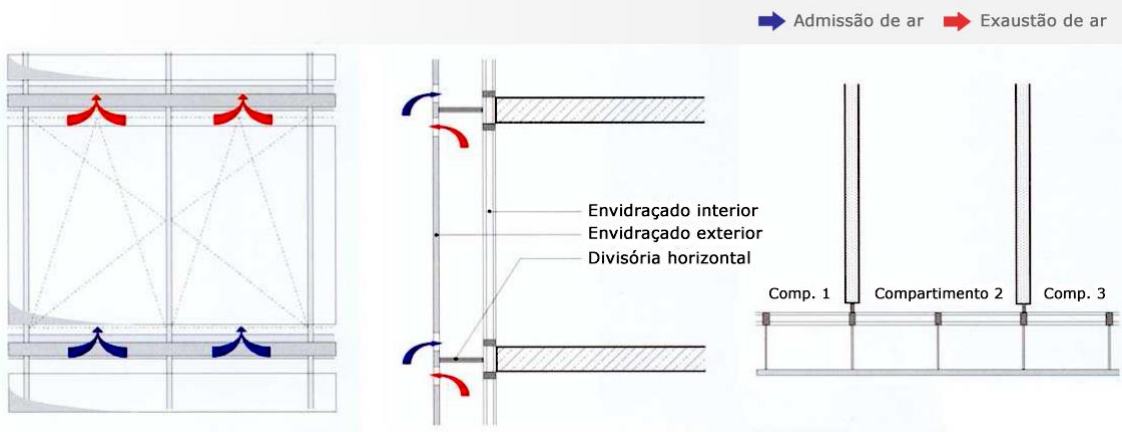


Fig. 2.9 – Geometria e esquema geral de ventilação de uma fachada do tipo “Confinada”  
(vista frontal – corte em perfil – corte horizontal) [adaptado de Oesterle, Lieb, e Green (2001)]

#### 2.4.2.2 Fachada Corredor (“Corridor facade”)

As fachadas do tipo Corredor caracterizam-se por uma cavidade dividida horizontalmente ao nível de cada piso do edifício, não havendo normalmente divisórias verticais dentro de cada nível, a não ser devido a questões acústicas ou de segurança contra incêndio – ver Fig. 2.10. Em alguns casos, a cavidade deste tipo de FDP pode ser visitável, o que obriga a que a caixa de ar seja mais espessa e que a divisória horizontal tenha uma resistência acrescida (Uuttu 2001). As aberturas de ar da fachada exterior encontram-se, em cada piso, desfalcadas dos níveis inferior e superior de modo a evitar que o ar quente que sai de um patamar volte a entrar na cavidade pela abertura imediatamente acima.

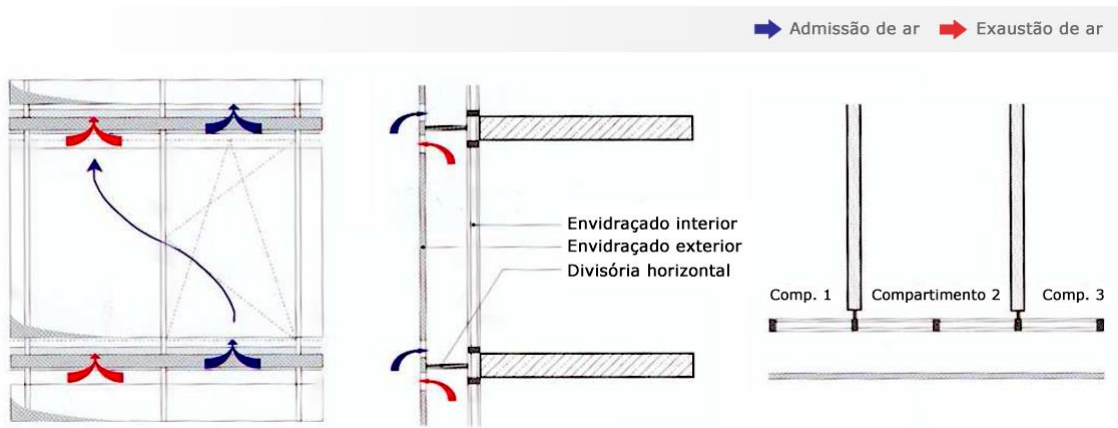


Fig. 2.10 – Geometria e esquema geral de ventilação de uma fachada do tipo “Corredor”  
(vista frontal – corte em perfil – corte horizontal) [adaptado de Oesterle, Lieb, e Green (2001)]



### 2.4.2.3 Fachada Chaminé (“Shaft box type”)

As fachadas do tipo Chaminé (ou coluna de ventilação) são compostas por módulos individuais de forma semelhante às fachadas Confinadas que são dispostos adjacente e de forma alternada com condutas coletivas de ventilação – ver Fig. 2.11. Estas condutas verticais estendem-se ao longo de toda a altura do edifício e contribuem para o efeito chaminé, tornando a ventilação natural da cavidade mais eficiente. O ar entra por aberturas individuais localizadas na base de cada módulo e são transferidas através de orifícios (localizados na interface dos dois elementos) para a coluna de ventilação, de onde é conduzido ascendentemente até ao exterior.

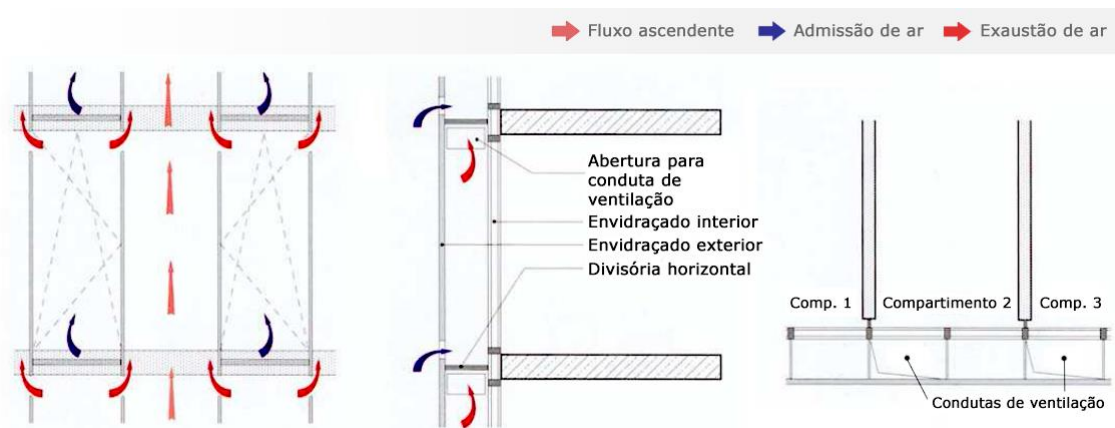


Fig. 2.11 – Geometria e esquema geral de ventilação de uma fachada do tipo “Chaminé”  
(vista frontal – corte em perfil – corte horizontal) [adaptado de Oesterle, Lieb, e Green (2001)]

### 2.4.2.4 Fachada Multi-Piso (“Multi-storey double skin facade”)

As fachadas do tipo Multi-Piso não têm divisórias verticais nem horizontais, estendendo-se a sua cavidade ao longo da totalidade da altura do edifício – ver Fig. 2.12. O ar entra pela base da fachada e sobe até ao topo do edifício através do efeito chaminé e da ação do vento. Normalmente neste tipo de fachadas, a cavidade intermédia é suficientemente larga de modo a permitir a circulação de pessoas para fazer a limpeza e manutenção da mesma. O comportamento acústico destas fachadas em relação ao ruído exterior é uma das suas maiores vantagens comparativamente às restantes tipologias apresentadas, uma vez que as únicas aberturas se localizam normalmente na base e no topo da fachada. Existe ainda uma derivação deste modelo chamada “multi-storey louver facade”, na qual a pele exterior pode conter várias aberturas para ventilação ao longo de toda a altura do edifício. No entanto, esta solução é menos interessante do ponto de vista acústico (Loncour et al. 2004).

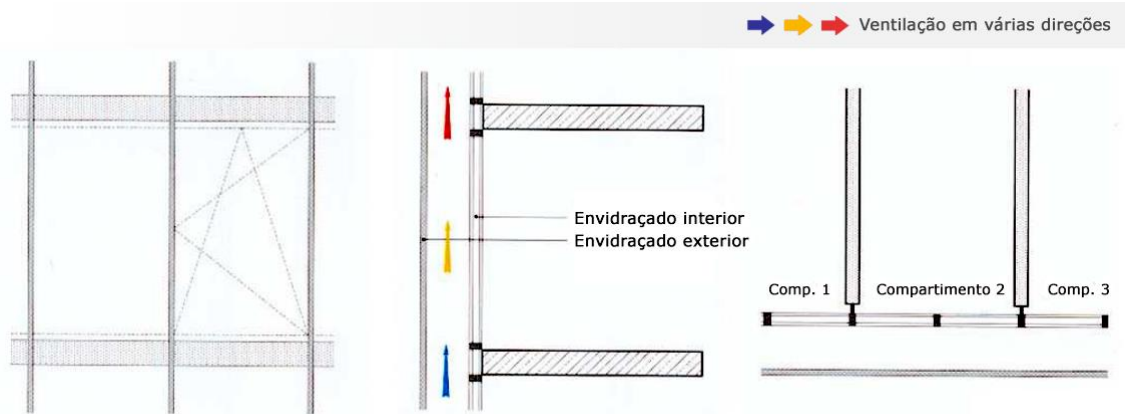


Fig. 2.12 – Geometria e esquema geral de ventilação de uma fachada do tipo “Multi-Piso” (vista frontal – corte em perfil – corte horizontal) [adaptado de Oesterle, Lieb, e Green (2001)]

#### 2.4.3 PERCURSO DO FLUXO DE AR NA CAVIDADE

Este terceiro parâmetro classificador das fachadas de dupla pele prende-se com a disposição das aberturas para entrada e saída de ar, que influencia o modo como a cavidade é ventilada. Esta forma de classificação é independente do tipo de ventilação descrito em 2.4.1. No entanto, é de realçar que nem todos os esquemas de ventilação são compatíveis com todas as geometrias definidas em 2.4.2, já que um certo tipo de fachada apenas admite um único percurso do fluxo de ar num determinado momento. No entanto, caso a fachada possua elementos operáveis, como aberturas dinâmicas, é possível que um tipo de fachada apresente, em diferentes alturas, um esquema de circulação do ar alternativo, conforme a posição desses elementos (Loncour et al. 2004). Assim sendo, é possível classificarem-se cinco modos de ventilação distintos:

- Tampão (“Buffer zone”);
- Cortina de Ar Exterior (“Outdoor air curtain”);
- Cortina de Ar Interior (“Indoor air curtain”);
- Admissão de Ar (“Air supply”);
- Exaustão de Ar (“Air exhaust”).

A esquematização de cada um destes modos de ventilação vem apresentado na Fig. 2.13.

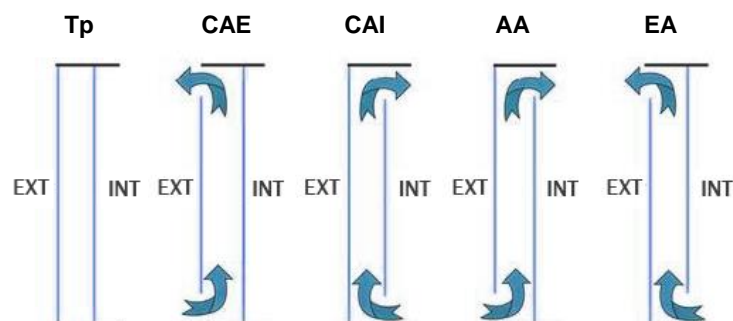


Fig. 2.13 – Esquematização dos diferentes tipos de percurso do fluxo de ar na cavidade de uma FDP



#### 2.4.3.1 Fachada Tampão (“Buffer zone”);

No caso de uma fachada Tampão (Tp), o canal intermédio forma um espaço hermético, não havendo ventilação da caixa de ar, nem trocas de ar entre o exterior e o interior. Esta tipologia é mais indicada para climas mais frios em que se pretenda diminuir as perdas de calor através do envidraçado. As restantes tipologias de FDP podem adotar um funcionamento semelhante ao de uma fachada Tampão através do fecho de todas as suas grelhas de ventilação.

#### 2.4.3.2 Fachada Cortina de Ar Exterior (“Outdoor air curtain”)

No caso de uma fachada de Cortina de Ar Exterior (CAE), o ar proveniente do exterior entra na base da fachada, percorre a caixa de ar ascendentemente e retorna ao exterior através de uma grelha de ventilação localizada na zona superior do pano exterior da fachada. Não se verificam trocas de ar entre a caixa de ar e o interior do edifício. O propósito deste modo de ventilação é o arrefecimento da cavidade da FDP através da circulação de ar proveniente do exterior (a uma temperatura inferior relativamente ao ar que se encontra na cavidade). Este esquema de ventilação é adequado para climas mais quentes, pois a diminuição da temperatura do ar na cavidade possibilita uma maior dissipação de calor do interior (zona ocupada).

#### 2.4.3.3 Fachada Cortina de Ar Interior (“Indoor air curtain”);

No caso de uma fachada de Cortina de Ar Interior (CAI), a cavidade da FDP é ventilada somente com recurso ao ar interior, não se verificando trocas de ar com o ambiente exterior. As pressões geradas pela insuflação de ar no interior do edifício (pelo sistema de AVAC) aliadas ao efeito chaminé fazem com que o ar entre na caixa de ar. Uma vez na cavidade, o ar aquece, percorre a cavidade até ao seu topo e volta a entrar na zona ocupada. Este modo de ventilação é normalmente utilizado durante os meses mais frios com o objetivo de ajudar a aquecer o ambiente interior e de diminuir as necessidades de climatização do edifício.

#### 2.4.3.4 Fachada Admissão de Ar (“Air suply”)

No caso de uma fachada de Admissão de Ar (AA), a fachada é ventilada com ar proveniente do exterior que em seguida é conduzido para o interior do edifício. O percurso do ar exterior pela fachada permite que este aqueça antes de penetrar no ambiente interior, o que torna este modo de ventilação especialmente interessante em climas temperados. Este tipo de funcionamento apenas é possível quando conjugado com um sistema de extração mecânica de ar na zona ocupada do edifício, ou na cavidade da própria FDP.

#### 2.4.3.5 Fachada Exaustão de Ar (“Air exhaust”)

No caso de uma fachada de Exaustão de Ar (EA), a fachada é ventilada com ar proveniente do interior do edifício que de seguida é conduzido para o exterior, através do efeito chaminé na cavidade. Nestes casos, o edifício deve ter integrado um sistema de ventilação mecânica de admissão de ar que provocará uma sobrepressão na zona ocupada, obrigando o ar a ser extraído pelas grelhas localizadas na base do envidraçado interior e a atravessar a cavidade da FDP até ao exterior.

## **2.5. VANTAGENS E DESVANTAGENS**

A integração de fachadas de dupla pele num edifício pode ser uma mais-valia para o seu comportamento térmico, contribuindo para uma diminuição do consumo de energia e para a melhoria do conforto dos utilizadores. No entanto, esta tecnologia também acarreta certas desvantagens que devem ser tidas em conta e que podem fazer das FDP um mau investimento em determinados casos. Deste modo, é extremamente importante haver um estudo prévio baseado no local, clima e tipo de utilização do edifício, de modo a que seja possível fazer uma escolha acertada para que o investimento inicial relativo à sua instalação tenha um período de retorno interessante do ponto de vista económico.

### ▪ Isolamento térmico

Apesar de o acréscimo de mais uma fachada de vidro não representar, por si só, um contributo muito significativo para o coeficiente de transmissão térmica total da fachada (U), a existência de uma caixa de ar entre os dois envidraçados traz melhorias do ponto de vista térmico durante a estação de aquecimento no caso de a fachada ter uma circulação de ar limitada. Para além disso, no caso de o edifício possuir um sistema de AVAC integrado, é possível encaminhar do ar existente no espaço de separação das fachadas para o interior do edifício (Stec, Van Paassen, e Maziarz 2005). Este ar é aquecido devido ao efeito estufa na cavidade e pode ser utilizado pelo sistema de ventilação e ar condicionado para a climatização do edifício.

Na estação de arrefecimento, uma ventilação abundante do canal de ar aliada à utilização de elementos de sombreamento eficientes contribui para uma redução da temperatura fictícia ar-sol na fachada interior. Para além disso, o calor absorvido pelos dispositivos de sombreamento é extraído da fachada por efeito chaminé (Gomes e Rodrigues 2010). Durante os meses mais quentes, é também possível utilizar uma estratégia de ventilação noturna para conseguir um arrefecimento mais eficiente do edifício, estando este protegido contra fenómenos meteorológicos ou possíveis invasões de propriedade.

### ▪ Isolamento acústico

A aplicação de um segundo envidraçado numa fachada traz com ela uma melhoria do isolamento acústico do edifício em relação a ruídos provenientes do exterior. Esta redução dos níveis de ruído varia muito em função de critérios como o tipo de vidro utilizado, a geometria da fachada e o número e dimensão de aberturas, podendo o valor da redução sonora chegar aos 28 dB (Batungbakal 2013). Os melhores resultados são obtidos para fachadas do tipo Multi-Piso, com poucas aberturas e com vidros de espessuras diferentes (de modo a fazer baixar a frequência crítica do conjunto).

### ▪ Proteção contra agentes exteriores

Ao fazer a instalação dos dispositivos de sombreamento no espaço intermédio da fachada, estes ficam protegidos da ação do vento e da chuva, aumentando a durabilidade destes e fazendo com que se possa optar por elementos menos resistentes e mais económicos. O mesmo acontece com a fachada interior, cujos custos de manutenção são reduzidos com a introdução de uma segunda pele. A proteção contra o vento ganha uma maior importância em edifícios de elevada altura, nos quais uma FDP possibilita aos ocupantes dos últimos pisos a abertura das janelas interiores, mesmo em condições de ventos fortes.

- **Aspeto estético**

A procura por uma envolvente transparente sempre foi um dos objetivos da arquitetura moderna (Lee et al. 2002). O aproveitamento ao máximo da iluminação natural e o sentimento de envolvimento com o ambiente exterior são fatores de difícil conciliação com a eficiência energética de um edifício. As fachadas de dupla pele permitem uma melhoria significativa do comportamento térmico dos edifícios totalmente envidraçados, exibindo várias vantagens em relação às fachadas de vidro tradicionais ao mesmo tempo que transmitem um aspeto moderno e de leveza à construção (Crosby et al. 2008).

- **Conforto térmico**

O aquecimento do ar no canal intermédio da fachada de dupla pele faz com que, no inverno, a temperatura superficial interior da fachada seja mais elevada do que no caso de uma fachada de vidro tradicional, aproximando-se da temperatura interior (Saelens, Carmeliet, e Hens 2002). Isto faz com que a temperatura radiante do edifício se aproxime mais da ideal e contribui para o conforto dos ocupantes, especialmente nas zonas próximas da envolvente.

- **Custo inicial**

A construção de uma segunda fachada é naturalmente mais dispendiosa e mais complexa comparativamente ao caso de fachadas simples. Apesar de possibilitar uma contenção de custos nos dispositivos de sombreamento e nos materiais da fachada interior (por estes não estarem em contacto direto com o ambiente exterior), no geral, a construção de um edifício desta tipologia torna-se mais dispendiosa comparativamente com as soluções tradicionais. O custo deste tipo de construção depende de vários fatores relacionados com a sua geometria e materiais utilizados. No entanto, é estimado que a aplicação de uma fachada de dupla pele se traduza num acréscimo de 25 % dos custos de construção relativamente a uma fachada envidraçada simples (Oesterle, Lieb, e Green 2001). Também os custos de limpeza, operação e manutenção da cavidade da FDP e da cortina exterior contribuem para tornar esta solução menos atrativa do ponto de vista monetário.

- **Diminuição da área útil**

A implementação de uma segunda fachada em conjugação com uma cavidade, que pode em alguns casos atingir vários metros de espessura, acarreta uma maior área de implantação do edifício, ou, nas situações em que isso não é possível, uma diminuição do espaço útil de pavimento. Isto leva a que seja da maior importância o correto dimensionamento e otimização da espessura deste espaço intermédio, de modo a que o projeto se torne economicamente viável.

- **Propagação do fogo**

No caso de fachadas cujo espaço de ar seja comum a múltiplos compartimentos ou andares, como é o caso de fachadas do tipo “Corredor”, “Chaminé” ou “Multi-Piso”, existe o risco de o fogo e o fumo se propagarem para as divisões ou pisos adjacentes do edifício. Numa situação de incêndio, uma segunda fachada também dificulta o combate das chamas a partir do exterior.

- **Transmissão sonora entre pisos**

Apesar deste tipo de fachada trazer vantagens do ponto de vista de diminuição dos níveis de ruído provenientes do exterior, o mesmo não acontece com ruídos vindos do interior do edifício. O envidraçado exterior pode funcionar como barreira refletora para as ondas sonoras e provocar um acréscimo de ruído nos compartimentos contíguos. A bibliografia estudada (Streicher 2005) indica que as transmissões marginais ao nível da cavidade de uma FDP podem resultar numa diminuição do índice

de redução sonora aparente até -8 dB em relação a fachadas de vidro simples. Para além disso, o fluxo de ar na cavidade também pode provocar ruído no caso de este ter uma velocidade de circulação demasiado elevada.

## 2.6. ESTUDOS ANTERIORES NO ÂMBITO DAS FDP

Com o aumento da popularidade das fachadas de dupla pele no fim da década de noventa, surgiu a necessidade de comprovar a eficiência destes elementos de modo a justificar o seu custo. Para este fim, foram realizados estudos através da aplicação de aparelhos de medição de caudal de ar e de temperatura em edifícios já existentes, que deste modo permitiriam averiguar se realmente a aplicação deste novo modelo de envolvente se traduziria numa poupança energética. Mais tarde, com o desenvolvimento de *software* numérico de modelação e simulação, tornou-se possível explorar novas soluções teóricas de fachada e a sua inserção nos mais variados climas.

Na última década têm vindo a ser realizados diversos estudos nesta área, cujos tópicos de pesquisa vão desde a espessura da cavidade ao tipo de vidro adotado, passando pela radiação solar incidente e o tipo de dispositivos de sombreamento utilizados.

### ▪ Ventilação da cavidade

Giuseppe Ballestini (2005) investigou a aplicação de um sistema de fachada de dupla pele com ventilação natural no restauro de uma fábrica de sedas, num clima mediterrânico. Através de simulações dinâmicas com recurso a *software* de cálculo foi demonstrado que uma FDP poderia resultar numa poupança energética até 12 %, revelando-se uma aposta a ter em conta na reabilitação de edifícios antigos.

Elisabeth Gratia e André De Herde (2007) analisaram a influência do vento na temperatura atingida na cavidade de uma FDP. Num dia de inverno, com céu limpo e sem vento, a temperatura entre os envidraçados exterior e interior pode atingir os 45 °C – ver Fig. 2.14. Através de um programa de simulação energética de edifícios (BES) constatou-se que uma velocidade do vento de apenas 4 m/s faz baixar essa temperatura 13,6 °C, realçando a importância de uma ventilação eficiente das fachadas de dupla pele.

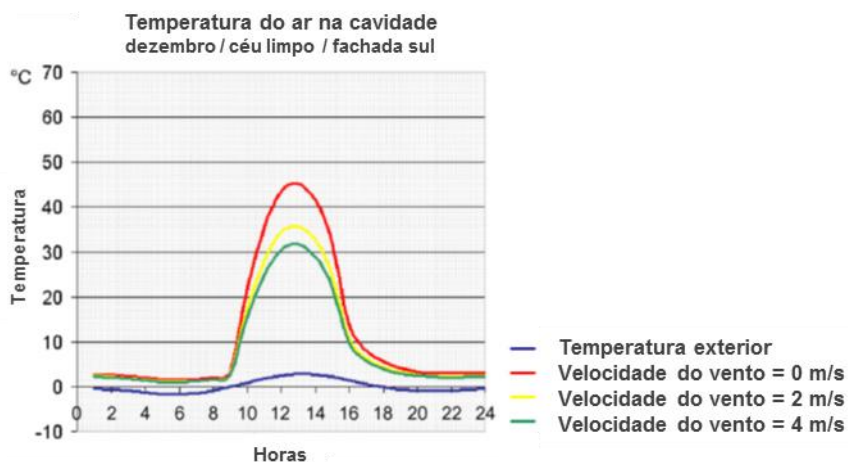


Fig. 2.14 – Variação da temperatura na cavidade de uma FDP com a velocidade do vento [adaptado de Gratia e De Herde (2007)]

Wenting Ding, Yuji Hasemi e Tokiyoshi Yamada (2005) sugeriram a aplicação de um sistema de “acumulação térmica” no topo da fachada, de modo a melhorar a sua ventilação natural. Com recurso a modelos à escala e simulações em computador, provaram que esta “chaminé solar”, como lhe chamaram, apenas teria efeitos positivos na ventilação por efeito chaminé se se atingisse pelo menos onze metros acima do edifício, revelando-se portanto pouco viável.

Um ano mais tarde, a mesma equipa de Wenting Ding (2006) voltou a publicar um estudo acerca de fachadas de dupla pele. Neste documento, abordaram a temática da propagação de fumo nas FDP com recurso a modelos à escala (ver Fig. 2.15) e programas de análise de Dinâmica de Fluidos Computacional (CFD). Através dos seus estudos provou-se que é possível evitar a propagação de fumo por toda a cavidade da FDP através da aplicação de aberturas adequadas ao longo da extensão da fachada. No entanto, este estudo não considerou a inclusão de dispositivos de sombreamento na cavidade intermédia, que é uma situação comum ao nível das fachadas de dupla pele e que pode ter consequências no fluxo de extração do fumo.



Fig. 2.15 - Experiência de propagação de fumo com modelo à escala (Ding e Hasemi 2006)

- Radiação solar

G. Baldinelli (2009) investigou o efeito da utilização de dispositivos de sombreamento operáveis na cavidade de uma FDP. Através de medições “in situ” e simulações numéricas, foi possível concluir que no inverno seria possível atingir uma poupança de 60 kWh por ano e por metro quadrado de FDP em comparação com uma envolvente totalmente opaca.

Y. Ji e M. Cook, entre outros (2007) analisaram a influência da existência de estores com lâminas com várias inclinações diferentes no comportamento da fachada. Concluiu-se que, para além da sua função de sombreamento, os estores laminados contribuíam para uma melhor ventilação natural da cavidade. O calor absorvido pelas lâminas do estore catalisa o efeito chaminé, conduzindo o fluxo de ar quente até ao topo da fachada de forma mais eficiente. Em medições laboratoriais determinou-se que a presença de um estore melhora a ventilação natural até 35 % no caso de as lâminas formarem um ângulo de 80° com a horizontal.

Elisabeth Gratia e André De Herde (2007) estudaram a implementação de fachadas dupla pele no clima belga e demonstraram que, numa fachada orientada a Sul sem qualquer dispositivo de sombreamento, a temperatura na cavidade era, em média, 20 °C superior à temperatura exterior, em dias de sol. Para dias de céu nublado, esta diferença seria no máximo de 10 °C.

Neveen Hamza (2008) estudou o comportamento de uma FDP para várias orientações diferentes e concluiu que Este e Oeste são as orientações mais gravosas a nível das necessidades de arrefecimento (ver Fig. 2.16), pois implicam maiores ganhos solares nas primeiras horas da manhã e ao fim do dia. Ainda dentro deste estudo, Hamza confirmou que a fachada Norte é a que requer menos energia de climatização durante a estação de arrefecimento.

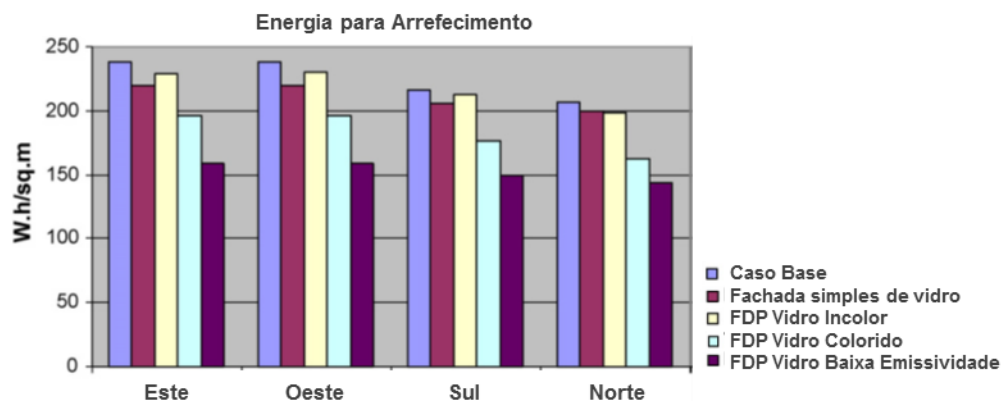


Fig. 2.16 – Comparação das necessidades totais de arrefecimento entre uma fachada envidraçada simples e diferentes tipos de FDP para várias orientações [adaptado de Hamza (2008)]

Hassan Radhi (2013) avaliou a transferência de calor por convecção na cavidade de ar de diferentes FDP em função da sua espessura. Os resultados demonstraram que espessuras menores dão origem a um efeito chaminé mais elevado e, consequentemente, a uma extração do ar quente da fachada mais eficiente. Espessuras maiores fariam diminuir o efeito chaminé, possibilitando uma maior transferência de calor com o interior através das aberturas da fachada interna. Esta situação seria mais interessante durante a estação de aquecimento. Assim, o autor recomenda espessuras da cavidade entre 70 centímetros e 1,20 metros de modo a balancear o comportamento ótimo de verão e de inverno.

Jeong Kim e Laura Schaefer (2012) exploraram o efeito da aplicação de uma fachada de dupla pele na reabilitação de um edifício residencial de cinco pisos localizado na península da Coreia. A envolvente do edifício orientada a Sul foi simulada com várias tipologias de fachada de modo a atestar a sua adequabilidade. Os resultados demonstraram que a aplicação de uma FDP trazia uma melhoria significativa ao comportamento energético do edifício e que os melhores resultados eram obtidos com uma cavidade de 90 centímetros de espessura, verificando-se uma poupança anual de energia na ordem dos 38 %. Uma solução também interessante seria a cavidade com 60 centímetros de espessura que, apesar de representar um ligeiro aumento no consumo energético, tem vantagens associadas a um melhor aproveitamento da área útil do edifício – ver Fig. 2.17.

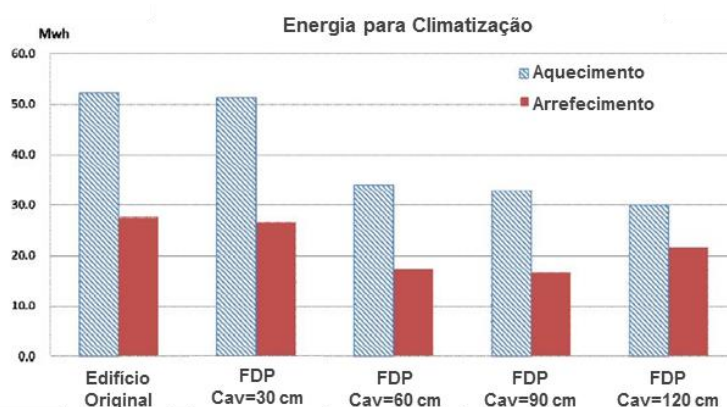


Fig. 2.17 – Energia necessária para a climatização de edifícios com FDP com diferentes espessuras da caixa de ar [adaptado de Kim, Schaefer, e Kim (2012)]

- Características físicas da FDP

N. Mingotti (2013) fez uma análise dos materiais usados na construção de fachadas do tipo Tampão. Através de modelos analíticos aplicados a edifícios com ventilação mecânica em climas quentes, concluiu que a utilização de vidro duplo na fachada interior minimiza as trocas de calor por radiação e por convecção entre o exterior e a zona ocupada do edifício. Isto leva a que haja uma menor transferência de calor para os compartimentos adjacentes à fachada, o que é interessante em climas quentes. Aliada a isto, a escolha de um vidro com elevado fator solar para a fachada exterior contribui também para uma diminuição das necessidades de arrefecimento.

Elisabeth Gratia e André De Herde (2007) observaram que cavidades com aberturas maiores apresentavam uma menor temperatura e uma maior taxa de renovação de ar – ver Fig. 2.18. No entanto, o estudo revelou que não existe uma relação de proporcionalidade direta entre estas grandezas, uma vez que há outros parâmetros a ter em conta, como as condições climatéricas exteriores e a restante geometria da fachada.

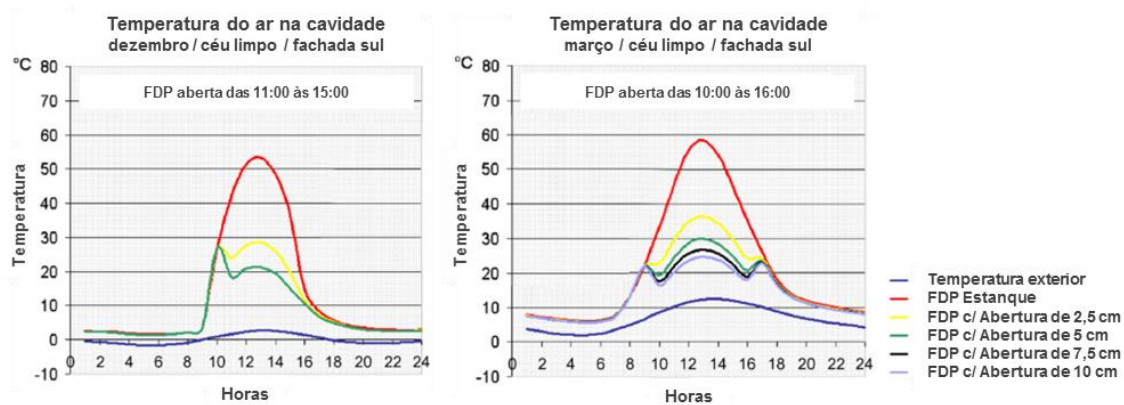


Fig. 2.18 – Variação da temperatura na fachada em função da dimensão das aberturas exteriores [adaptado de Gratia e De Herde (2007)]

Stephen Sharples e Fayze Fikiry (2013) provaram através de simulações numéricas que a altura da cavidade de uma fachada de dupla pele é essencial para uma boa extração de ar. Para que se verifique a existência de uma diferença de pressões suficientemente elevada para permitir a ventilação natural do espaço de ar, cada elemento da fachada deve abranger pelo menos a altura de dois pisos e não podem existir barreiras físicas horizontais que impeçam a ascensão do ar.

S. K. Chou (2009) explorou a influência do quociente da área de parede pela área de janelas na fachada interior (wall-window ratio) nos ganhos solares de um edifício, em Singapura. A partir de um modelo à escala, concluiu laboratorialmente que a fixação deste parâmetro com o valor de 0,5 e 0,7 corresponderia a uma diminuição da transferência de calor para o exterior em relação a um edifício genérico de 32,9 % e 12,4 %, respetivamente. No entanto, aumentar este rácio para 0,9 já provocaria um aumento das trocas de calor com o exterior.



## 2.7. EXEMPLOS DE APLICAÇÃO EM PORTUGAL

Em Portugal, o primeiro edifício a ser construído com uma fachada de dupla pele foi a sede da Caixa Geral de Depósitos, em Lisboa, concluído em 1987 – ver Fig. 2.19.

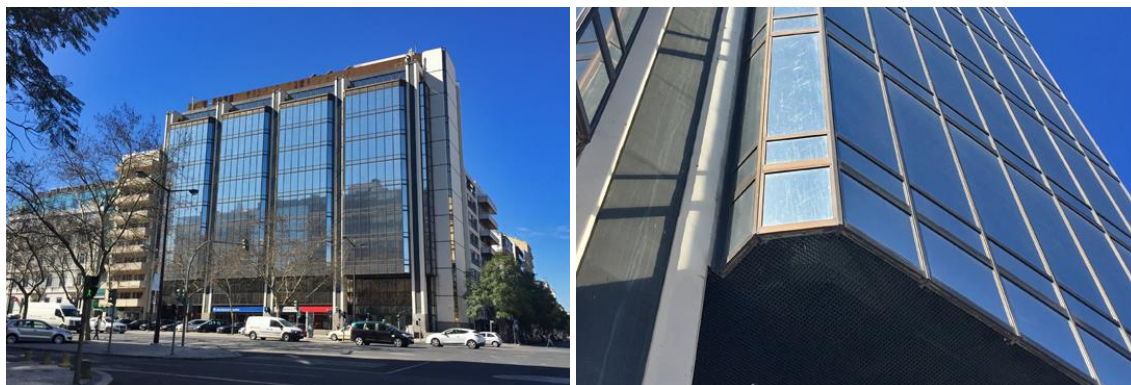


Fig. 2.19 – Edifício da Caixa Geral de Depósitos em Lisboa

Ao longo das duas décadas seguintes verificou-se a aplicação deste modelo de fachada a mais alguns edifícios (principalmente na capital) associados a importantes instituições financeiras. Tratam-se portanto de edifícios de escritórios, normalmente com cinco ou mais pisos e cujas tipologias mais comuns são as fachadas do tipo “Corredor” e “Multi-Piso”. As razões apontadas para a adoção deste sistema recaem principalmente na necessidade de poupar energia (Streicher 2005).

Um exemplo mais recente de fachadas de dupla pele usadas em Portugal é o do “Natura Towers”, um complexo de edifícios de escritórios, construído em 2010 e sede do Grupo MSF – ver Fig. 2.20. O empreendimento é constituído por duas torres com o certificado energético A+, sendo o primeiro edifício de escritórios em Portugal a alcançar esta classificação (MSF Engenharia S.A. 2015). Estima-se que a implementação das fachadas de dupla pele aliada à sua correta utilização no inverno e no verão se traduza numa redução do consumo energético de 69 % em aquecimento e 41 % em arrefecimento.

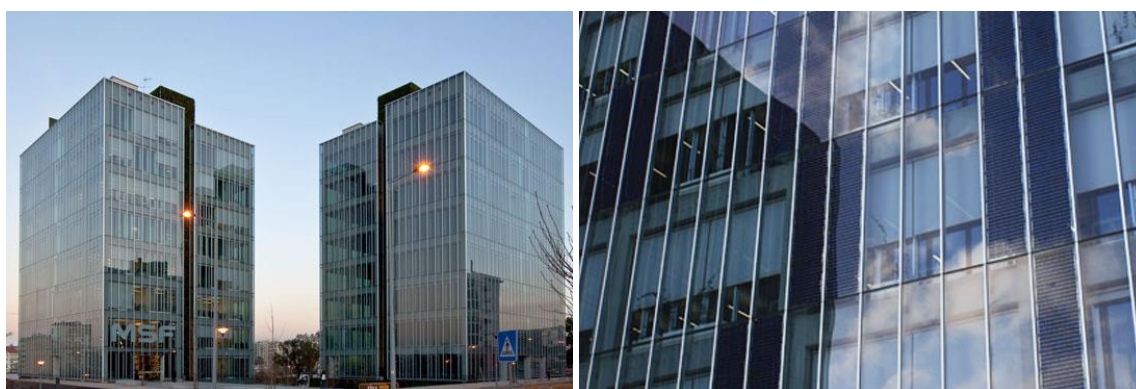


Fig. 2.20 – Sede do grupo MSF Engenharia, S.A. em Lisboa (MSF Engenharia S.A. 2015)

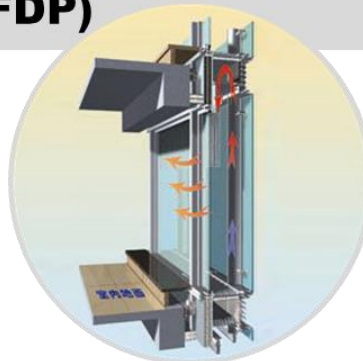
## 2.8. SÍNTESE DO CAPÍTULO

De modo a resumir a informação apresentada ao longo de todo este capítulo e a sintetizar as informações recolhidas acerca das FDP, agregou-se toda esta informação na Fig. 2.21.

### Fachadas de Dupla Pele (FDP)

#### DEFINIÇÃO

As fachadas de dupla pele são elementos construtivos compostos por dois vãos envidraçados com uma cavidade central que pode servir de caixa de ar selada ou destinar-se à circulação de ar responsável pela manutenção da temperatura da fachada.



#### CLASSIFICAÇÃO

##### Tipo de Ventilação

Natural

Mecânica

Híbrida

##### Geometria

Confinada

Corredor

Chaminé

Multi-Piso

##### Percurso do Fluxo de Ar

Tampão

Cortina de Ar Exterior

Cortina de Ar Interior

Admissão de Ar

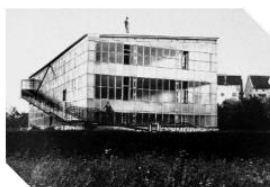
Exaustão de Ar

#### HISTÓRIA



1849

Jean-Baptiste Jobard cria o primeiro conceito relacionado com fachada de dupla pele.



1903

Primeiro registo de um edifício com FDP em Giengen an der Brenz, na Alemanha.



1987

Conclusão da construção do primeiro edifício com FDP em Portugal.

#### VANTAGENS/DESVANTAGENS



- . Isolamento térmico
- . Isolamento acústico
- . Proteção contra agentes exteriores
- . Aspeto estético
- . Conforto

- . Custo inicial
- . Diminuição da área útil
- . Propagação do fogo
- . Transmissão sonora entre pisos

Fig. 2.21 – Síntese dos aspetos relacionados com FDP apresentados no Capítulo 2

# 3

## MODELAÇÃO NO DESIGNBUILDER

### 3.1. ENQUADRAMENTO

No presente capítulo será apresentado o programa de simulação numérica DesignBuilder, será discutida a metodologia de cálculo utilizada pelo programa e identificadas as principais variáveis e equações que entram no cálculo do comportamento de uma fachada de dupla pele. Numa segunda parte, será definido o modelo base de simulação e descrito passo a passo o processo de modelação de uma FDP.

### 3.2. INTRODUÇÃO AO PROGRAMA DESIGNBUILDER

A crescente preocupação com a eficiência energética dos edifícios faz com que a melhoria do seu desempenho térmico seja uma preocupação muito atual. Para um estudo mais rápido e otimizado das características térmicas da envolvente dos edifícios, têm vindo a ser desenvolvidas ferramentas informáticas que permitem quantificar de forma automática as necessidades de climatização de um espaço. Para o desenvolvimento desta dissertação será utilizado o programa DesignBuilder de modo a auxiliar o estudo da influência da aplicação de várias tipologias de fachadas de dupla pele no conforto térmico e no consumo de energia de um edifício.

#### 3.2.1 DESIGNBUILDER

O DesignBuilder é um programa de simulação térmica em regime variável ou dinâmico, que possibilita a introdução de dados referentes à geometria do edifício, materiais construtivos e características dos diversos sistemas de apoio, de modo a criar um modelo 3D do edifício a simular. A sua interface gráfica é uma mais-valia que torna as simulações com este *software* mais simples e intuitivas, até para utilizadores menos experientes – ver Fig. 3.1. No entanto, é também possível explorar o programa a um nível mais avançado, através da modelação de edifícios com elementos construtivos mais complexos, como é o caso das fachadas de dupla pele. A versão do DesignBuilder utilizada para o desenvolvimento desta dissertação foi a v3.4, lançada no ano de 2013.



Fig. 3.1 – Interface de utilização do programa DesignBuilder v3.4

O DesignBuilder foi especificamente desenvolvido em torno das capacidades de simulação do EnergyPlus. O EnergyPlus é um programa de modelação energética de edifícios desenvolvido para a simulação dos sistemas de aquecimento, arrefecimento, ventilação e iluminação artificial. O EnergyPlus foi criado pelo Laboratório Nacional de Lawrence Berkeley (LBNL), por iniciativa do Departamento de Energia Norte-Americano (DOE) a partir de outros dois *softwares* (o BLAST – “Building Loads Analysis and System Thermodynamics” e o DOE-2) e vem completamente integrado no DesignBuilder, tirando partido da qualidade da sua interface (DOE 2008). Este programa baseia-se nas características geométricas e físicas do edifício e dos diferentes sistemas integrados para proceder ao cálculo das necessidades de aquecimento e arrefecimento que garantam o conforto dos ocupantes e para avaliar a performance energética do edifício. A fidelidade dos seus resultados e a grande variedade de dados de saída fazem do EnergyPlus um dos *softwares* de simulação de edifícios mais utilizados em todo o mundo (Streicher 2005).

### 3.2.2 SIMULAÇÃO DE FACHADAS DE DUPLA PELE

O DesignBuilder tem a capacidade de simular fachadas de dupla pele como parte integrante de um edifício. O próprio programa traz por defeito um modelo de FDP, como exemplo da sua aplicação. É possível criar cavidades ventiladas, existindo também algoritmos de cálculo especificamente desenvolvidos para este tipo de elemento. Os ganhos solares através da fachada são também calculados pelo programa, quando selecionado o algoritmo correto que garante que são tidas em conta as reflexões de radiação no interior da cavidade. A ventilação da cavidade pode ser definida como mecânica ou de forma natural, por ação conjunta do vento e do efeito chaminé. O DesignBuilder possibilita a instalação de grelhas de ventilação de forma manual, o que viabiliza a simulação dos vários tipos de ventilação descritos no Capítulo 2.

No entanto, a bibliografia estudada refere algumas limitações do programa, especialmente relacionadas com a influência dos dispositivos de sombreamento nas trocas convectivas dentro da cavidade (Streicher 2005), com as trocas de ar com o interior quando se considera a ventilação natural da cavidade (Barbosa et al. 2013) e com o cálculo das temperaturas superficiais dos envidraçados que constituem a fachada (Kim e Park 2011). Estas situações específicas devem ser abordadas com alguma precaução e requerem ainda mais estudos práticos de modo a confirmar a exatidão do programa.

### 3.2.3 DETALHES DE CÁLCULO

O cálculo de fachadas de dupla pele no DesignBuilder consiste, de um modo geral, em três fases. Primeiro é calculada a distribuição da radiação solar por todo o modelo, em seguida é calculada a transmissão de calor através da fachada propriamente dita e, em terceiro lugar, o programa faz o balanço térmico de todas as superfícies de cada compartimento interno de modo a conhecer a temperatura no seu interior e a quantidade de energia a fornecer ao ar para atingir o equilíbrio.

As equações apresentadas de seguida são utilizadas nos processos internos de cálculo do DesignBuilder e do EnergyPlus e foram retiradas do documento “EnergyPlus Engineering Reference”, publicado pelo Departamento de Energia Norte Americano (2014).

#### 3.2.3.1 Balanço térmico interior

O balanço térmico de um compartimento é calculado tendo em conta todos os componentes que fornecem energia sobre a forma de calor a este – ver Fig. 3.2. Assim, a energia total armazenada no ar interior é a soma das parcelas correspondentes aos ganhos internos por convecção provenientes de pessoas e equipamentos, às trocas convectivas através dos elementos da envolvente interior (cuja temperatura superficial varia devido às trocas de calor com o exterior por condução e à incidência de radiação solar), às trocas de ar com outros compartimentos do edifício e com o exterior e às cargas térmicas fornecidas pelos sistemas de climatização. A formulação matemática deste balanço é expressa pela equação (3.1.), apresentada de seguida.

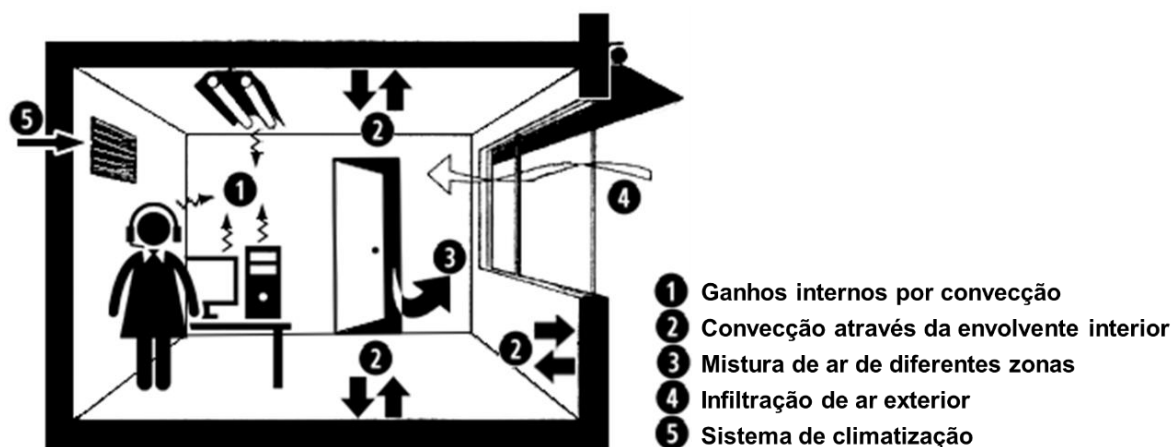


Fig. 3.2 – Esquemática das variáveis consideradas para o balanço térmico no DesignBuilder [adaptado de Simões (2008)]

$$C_z \frac{dT_z}{dt} = \sum_{i=1}^{N_{sl}} \dot{Q}_i + \sum_{i=1}^{N_{superf}} h_i \cdot A_i \cdot (T_{si} - T_z) + \sum_{i=1}^{N_{zonas}} \dot{m}_i \cdot C_p \cdot (T_{zi} - T_z) + \dot{m}_{inf} \cdot C_p \cdot (T_{\infty} - T_z) + \dot{Q}_{sist} \quad (3.1.)$$

$C_z \frac{dT_z}{dt}$  – Variação da energia total armazenada no ar interior [W]

$\sum_{i=1}^{N_{sl}} \dot{Q}_i$  – Soma dos ganhos internos por convecção [W] **(1)**

$\sum_{i=1}^{N_{superf}} h_i \cdot A_i \cdot (T_{si} - T_z)$  – Transferência de calor por convecção através das superfícies da envolvente interior do compartimento [W] **(2)**

$\sum_{i=1}^{N_{zonas}} \dot{m}_i \cdot C_p \cdot (T_{zi} - T_z)$  – Transferência de calor devido à mistura de ar de diferentes zonas [W] **(3)**

$\dot{m}_{inf} \cdot C_p \cdot (T_{\infty} - T_z)$  – Transferência de calor devido à infiltração de ar exterior [W] **(4)**

$\dot{Q}_{sist}$  – Troca de calor entre o ar interior da zona e o sistema de climatização [W] **(5)**

$C_z = \rho_{ar} \cdot C_p \cdot C_T$

$\rho_{ar}$  – Densidade do ar [kg/m<sup>3</sup>]

$C_p$  – Calor específico do ar da zona [J/kg.K]

$C_T$  – Fator de ponderação da transferência de calor sensível [K/m<sup>3</sup>]

$h_i$  – Coeficiente de transmissão térmica por convecção da superfície i [W/m<sup>2</sup>.K]

$A_i$  – Área da superfície i [m<sup>2</sup>]

$T_{si}$  – Temperatura da superfície i [K]

$T_z$  – Temperatura do ar na zona simulada [K]

$T_{zi}$  – Temperatura do ar na zona vizinha i [K]

$T_{\infty}$  – Temperatura do ar infiltrado [K]

Nos casos estudados ao longo desta dissertação serão feitas alterações ao nível da fachada que se irão traduzir na alteração dos parâmetros acima apresentados, como a transferência de calor por convecção através das superfícies da envolvente interior (2) ou a transferência de calor devido à infiltração de ar exterior (4). Em cada simulação é avaliado o valor da parcela da troca de calor entre o ar interior e o sistema de climatização (5) para a avaliação final da performance térmica da fachada.

### 3.2.3.2 Transferência de calor através de uma FDP

O balanço energético da transferência de calor através de uma fachada ventilada no DesignBuilder é feito através do balanço energético em cada uma das superfícies (exterior e interior) dos dois envidraçados que constituem a FDP – ver Fig. 3.3. O equilíbrio térmico de cada superfície é calculado tendo em conta as trocas de calor por radiação, convecção e condução, dando origem às quatro equações apresentadas de seguida:



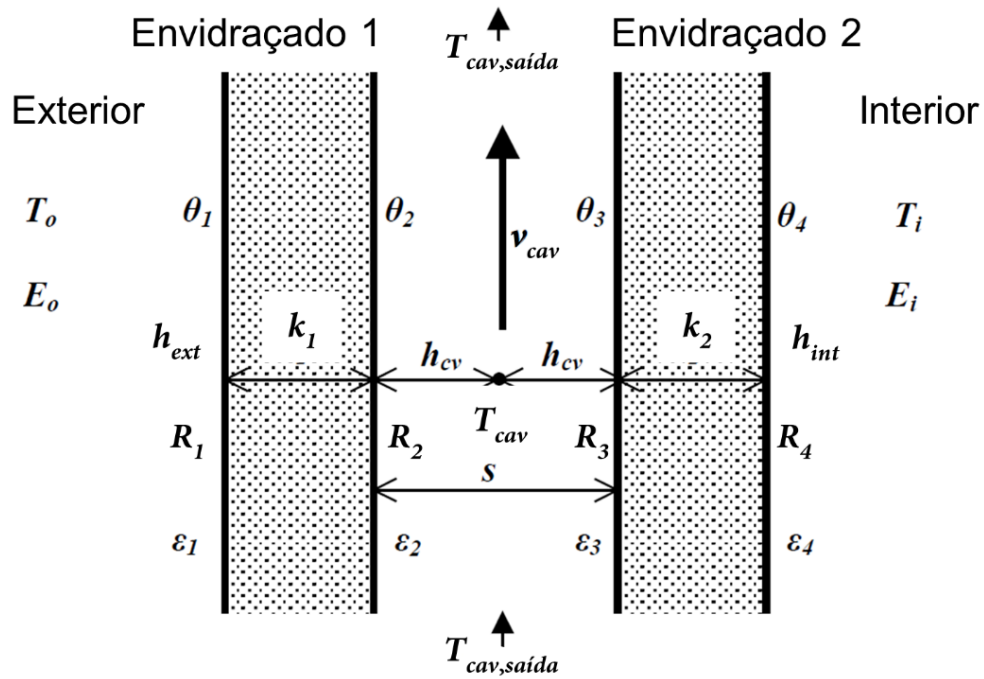


Fig. 3.3 – Esquematização das variáveis usadas no cálculo do balanço térmico de uma fachada de dupla pele ventilada [adaptado de DOE (2014)]

$$E_{ext} \cdot \varepsilon_1 - \varepsilon_1 \cdot \sigma \cdot \theta_1^4 + k_1 \cdot (\theta_2 - \theta_1) + h_{ext} \cdot (T_{ext} - \theta_1) + R_1 = 0 \quad (3.2.)$$

$$k_1 \cdot (\theta_1 - \theta_2) + h_{cv} \cdot (T_{cav} - \theta_2) + \sigma \cdot \frac{\varepsilon_2 \cdot \varepsilon_3}{1 - (1 - \varepsilon_2) \cdot (1 - \varepsilon_3)} \cdot (\theta_3^4 - \theta_2^4) + R_2 = 0 \quad (3.3.)$$

$$k_2 \cdot (\theta_4 - \theta_3) + h_{cv} \cdot (T_{cav} - \theta_3) + \sigma \cdot \frac{\varepsilon_2 \cdot \varepsilon_3}{1 - (1 - \varepsilon_2) \cdot (1 - \varepsilon_3)} \cdot (\theta_2^4 - \theta_3^4) + R_3 = 0 \quad (3.4.)$$

$$E_{int} \cdot \varepsilon_4 - \varepsilon_4 \cdot \sigma \cdot \theta_4^4 + k_2 \cdot (\theta_3 - \theta_4) + h_{int} \cdot (T_{int} - \theta_4) + R_4 = 0 \quad (3.5.)$$

$E_{ext}$  ,  $E_{int}$  – Radiação de onda longa (exterior/interior) incidente na fachada [W/m<sup>2</sup>]

$R_i$  – Radiação (de onda longa e de onda curta) absorvida pela face i [W/m<sup>2</sup>]

$\varepsilon_i$  – Emissividade da face i [–]

$\sigma$  – Constante de Stefan-Boltzmann [W/m<sup>2</sup>.K<sup>4</sup>]

$k_i$  – Condutância do envidraçado i [W/m<sup>2</sup>.K]

$h_{cv}$  – Coeficiente de transmissão térmica por convecção na cavidade [W/m<sup>2</sup>.K]

$h_{ext}$  ,  $h_{int}$  – Coeficiente de transmissão térmica por convecção no exterior/interior [W/m<sup>2</sup>.K]

$\theta_i$  – Temperatura superficial da face i [K]

$T_{ext}$  ,  $T_{int}$  ,  $T_{cav}$  – Temperatura do ar na zona exterior, interior e da cavidade [K]

Em cada uma das equações (3.2.), (3.3.), (3.4.) e (3.5.) existe uma parcela correspondente às trocas de calor por condução [ $k_i \cdot (\theta_{n+1} - \theta_n)$ ], às trocas convectivas [ $h_i \cdot (\theta_{n+1} - \theta_n)$ ] e à radiação (de onda curta e de onda longa) absorvida pelo vidro [ $R_i$ ]. Para além disso, nas equações correspondentes à face exterior do vidro exterior (3.2.) e à face interior do vidro interior (3.5.) está presente uma parcela que diz respeito à radiação de onda longa absorvida pela superfície do vidro, subtraída da radiação emitida pelo envidraçado [ $E_{ext} \cdot \varepsilon_1 - \varepsilon_1 \cdot \sigma \cdot \theta_1^4$ ]. Por último, na cavidade é necessário considerar as emissões de radiação de onda longa entre os dois envidraçados [ $\sigma \cdot \frac{\varepsilon_2 \cdot \varepsilon_3}{1 - (\varepsilon_2)(1 - \varepsilon_3)} \cdot (\theta_3^4 - \theta_2^4)$ ].

A temperatura na cavidade é determinada através de uma fórmula de cálculo baseada na média da temperatura superficial interior do vidro exterior ( $\theta_2$ ) e da temperatura superficial exterior do vidro interior ( $\theta_3$ ). A este valor é subtraído um fator relacionado com a temperatura e velocidade do ar que atravessa a cavidade.

$$T_{cav} = \frac{\theta_2 + \theta_3}{2} - \frac{H}{H_0} \cdot (T_{cav,saida} - T_{cav,entrada}) \quad (3.6.)$$

$T_{cav}$  – Temperatura média do ar na cavidade ventilada [K]

$H$  – Altura do envidraçado (m)

$H_0 = \frac{v_{cav} \cdot \rho_{ar} \cdot C_p \cdot s}{2 \cdot h_{cv}}$  – Altura característica (m)

$v_{cav}$  – Velocidade média de circulação do ar na cavidade [m/s]

$\rho_{ar}$  – Densidade do ar [kg/m<sup>3</sup>]

$C_p$  – Calor específico do ar da zona [J/kg.K]

$s$  – Espessura da cavidade [m]

$h_{cv}$  – Coeficiente de transmissão térmica por convecção na cavidade [W/m<sup>2</sup>.K]

O DesignBuilder faz algumas considerações durante o cálculo do balanço térmico de uma fachada ventilada:

- O fluxo de calor é considerado unidimensional e perpendicular ao envidraçado;
- As faces de vidro são consideradas isotérmicas devido à elevada condutibilidade térmica deste;
- A radiação solar de onda curta é absorvida uniformemente em toda a área do vidro e é igualmente distribuída pela face exterior e interior;
- Os envidraçados consideram-se opacos em relação à radiação interna proveniente da iluminação e de outros equipamentos elétricos, pelo que esta apenas é associada à face interior do envidraçado de separação da cavidade com a zona ocupada.



### 3.2.3.3 Algoritmos de distribuição solar

O DesignBuilder calcula a distribuição da radiação solar no interior de cada zona. Esta é constituída pela radiação solar direta, radiação solar difusa e radiação refletida. A distribuição da radiação solar é calculada em quatro fases distintas:

- Radiação absorvida pela envolvente exterior opaca;
- Radiação absorvida pelo envidraçado exterior e respetivos dispositivos de sombreamento;
- Radiação transmitida através do envidraçado interior e distribuída pela zona ocupada;
- Radiação refletida e transmitida de volta para o exterior.

O programa possui três algoritmos que definem como é que o programa fará a distribuição da radiação solar pelos vários elementos construtivos da envolvente interior do edifício: “Minimal shadowing”, “Full Exterior” e “Full interior and exterior”. Esta última opção é a mais completa pois calcula a quantidade de radiação solar que incide em todas as superfícies da zona simulada, incluindo pavimentos, paredes e tetos, ao projetar os raios solares através das janelas e tendo em consideração a possível existência de dispositivos de sombreamento – ver Fig. 3.4. Com a escolha deste algoritmo o programa calcula também as sucessivas reflexões de radiação que ocorrem entre os dois vãos envidraçados das fachadas de dupla pele, permitindo desse modo determinar as temperaturas superficiais interior e exterior de cada um dos dois envidraçados com maior exatidão.

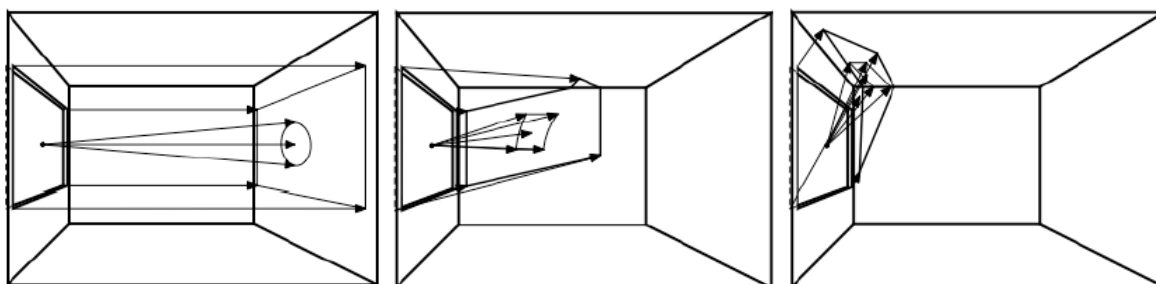


Fig. 3.4 – Projeção dos raios solares de acordo com o modelo “Full interior and exterior” (DOE 2014)

A totalidade dos ganhos solares transmitida através de um qualquer vão envidraçado é a combinação da radiação solar direta, difusa e refletida (ver Fig. 3.5), calculada a partir da expressão matemática (3.7.).

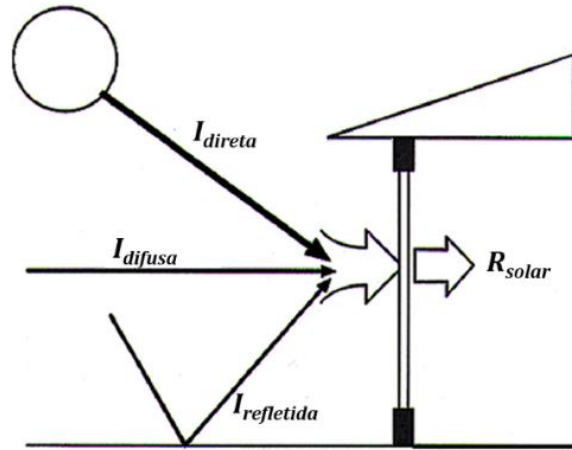


Fig. 3.5 – Esquematização das variáveis que influenciam o cálculo da radiação solar transmitida [adaptado de Marion e Wilcox (1995)]

$$R_{solar} = g_{\perp} \cdot \left( I_{direta} \cdot \cos \beta \cdot \frac{S_s}{S} + I_{difusa} \cdot \frac{1 + \cos \gamma}{2} + I_{refletida} \cdot \frac{1 - \cos \delta}{2} \right) \quad (3.7.)$$

$R_{solar}$  – Radiação solar transmitida [ $W/m^2$ ]

$g_{\perp}$  – Fator solar do vão envidraçado [–]

$I_{direta}$  – Intensidade da radiação solar direta [ $W/m^2$ ]

$\beta$  – Ângulo de incidência dos raios solares [rad]

$S_s$  – Área do envidraçado efetiva coletora de radiação solar [ $m^2$ ]

$S$  – Área total do envidraçado [ $W/m^2$ ]

$I_{difusa}$  – Intensidade da radiação solar difusa [ $W/m^2$ ]

$\gamma$  – Ângulo entre a superfície do envidraçado e o céu [rad]

$I_{refletida}$  – Intensidade da radiação solar difusa refletida pelo solo [ $W/m^2$ ]

$\delta$  – Ângulo entre a superfície do envidraçado e o solo [rad]

### 3.2.3.4 Ventilação mecânica

O DesignBuilder permite estabelecer diferentes tipos de ventilação para cada zona ou bloco. A ventilação mecânica é definida na aba “HVAC” e os parâmetros da sua caracterização dependem do modo de cálculo escolhido nas definições gerais do modelo. É possível selecionar dois tipos de modelação diferentes: “Room Ventilation” e “Ideal Loads”. Na primeira opção, a ventilação mecânica e o sistema de AVAC são modelados de forma separada, estando as cargas térmicas associadas a cada um destes discriminadas nos resultados. Esta opção permite ainda a definição do tipo de sistema de

ventilação como sendo de admissão ou de extração de ar. Apesar de esta opção parecer interessante no caso das fachadas de dupla pele, em que um sistema de exaustão de ar na zona ocupada teoricamente faria com que o ar fresco tivesse obrigatoriamente de atravessar a cavidade da FDP. No entanto, isto não se verifica pois o programa considera sempre que o ar que é utilizado para ventilar a zona ocupada é ar à temperatura exterior e não proveniente das zonas adjacentes (cavidade da FDP). A opção “Ideal Loads” modela o sistema de ventilação e de climatização em conjunto. A parcela das cargas térmicas originadas pela ventilação mecânica não é detalhada nos resultados, sendo o seu valor apresentado como aquecimento ou arrefecimento sensível. Esta opção será a escolhida para os diferentes casos simulados por ser a única compatível com o modelo de cálculo de ventilação natural que será selecionado.

Importa referir que a ventilação mecânica não tem influência na modelação da circulação de ar através de janelas, grelhas de ventilação ou orifícios. O DesignBuilder não calcula os caudais de ar que atravessam estes elementos quando apenas se encontra selecionada a opção de ventilação mecânica.

### 3.2.3.5 Ventilação natural (Airflow Network)

Existem duas abordagens para o cálculo da ventilação natural no DesignBuilder. Uma delas, a “Scheduled”, é usada quando é possível conhecer previamente e de forma rigorosa as condições de ventilação de um espaço. Com este modo selecionado, a ventilação natural é definida através da imposição do número de renovações horárias e dos períodos em que esta ocorre para cada zona. Como no caso em questão um dos objetivos é avaliar o caudal de ventilação da cavidade da FDP, será escolhida a segunda opção: “Calculated”. Com este modo selecionado, o programa utiliza o algoritmo “Airflow Network” do EnergyPlus para calcular o fluxo de ar que se estabelece através da conjugação da ação do vento e do efeito chaminé. Desta forma torna-se possível quantificar o caudal médio de ar que atravessa uma determinada grelha de ventilação e comparar a eficiência da ventilação de diferentes tipos de fachada. O programa calcula os caudais de ventilação com recurso às equações (3.8.) e (3.9.). A abertura e fecho das grelhas de admissão/exaustão podem ser controlados com recurso a um horário definido pelo utilizador, existindo também a possibilidade de ser feita a modelação de modo a que o seu funcionamento esteja dependente da temperatura interior ou exterior. É também possível que estas sejam desativadas no caso de precipitação ou em períodos em que a velocidade do vento seja demasiado elevada.

$$Q_{\text{vento}} = C_v \cdot A_{\text{abertura}} \cdot v \quad (3.8.)$$

$Q_{\text{vento}}$  – Caudal provocado pela ação do vento [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]

$C_v$  – Coeficiente de pressão do vento [–]

$A_{\text{abertura}}$  – Área da abertura [ $\text{m}^2$ ]

$v$  – Velocidade do vento [ $\text{m/s}$ ]

---

Nota: Os coeficientes de pressão do vento ( $C_v$ ) utilizados pelo DesignBuilder são retirados do “CIBSE Guide A” (CIBSE 1999) e dependem da exposição do edifício e do ângulo entre vento e a superfície do edifício em que este incide.

$$Q_{\text{chaminé}} = C_d \cdot A_{\text{abertura}} \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H' \cdot \frac{|\theta_{\text{int}} - \theta_{\text{ext}}|}{\theta_{\text{int}}}} \quad (3.9.)$$

$Q_{\text{chaminé}}$  – Caudal provocado pelo efeito chaminé [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]

$C_d$  – Coeficiente de descarga da abertura [–]

$A_{\text{abertura}}$  – Área da abertura [ $\text{m}^2$ ]

$g$  – Aceleração gravítica [ $\text{m}/\text{s}^2$ ]

$H'$  – Distância do ponto médio da abertura relativamente ao eixo neutro [m]

$\theta_{\text{int}}$  – Temperatura do ar interior [ $^{\circ}\text{C}$ ]

$\theta_{\text{ext}}$  – Temperatura do ar exterior [ $^{\circ}\text{C}$ ]

---

Nota: O coeficiente de descarga de uma grelha e ventilação ( $C_d$ ) é a relação entre a área efetiva de escoamento do ar e a área total da grelha.

### 3.2.3.6 Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD)

A análise CFD, ou “Computational Fluid Dynamics”, consiste numa série de métodos numéricos que são utilizados para estimar a temperatura, velocidade e direção do fluxo de ar dentro de um compartimento num certo instante no tempo. O DesignBuilder inclui um módulo que permite fazer simulações interiores ou exteriores com recurso ao CFD. Para se proceder a este tipo de análise é necessário definir as temperaturas e fluxos de ar que atravessam todas as superfícies de um compartimento, num dado instante de tempo. É muito importante que se estabeleça um balanço do fluxo de ar que é admitido (“Total flow in”) e que é extraído (“Total flow out”) do compartimento a analisar, caso contrário o DesignBuilder não permite executar a simulação. No DesignBuilder, a atribuição de valores a estes parâmetros é feita através do separador “CFD Boundary Conditions Edit”, acessível a partir do menu “Tools” – ver Fig. 3.6. O preenchimento dos dados referentes às diferentes superfícies e aberturas é facilitado caso se tenha procedido anteriormente à simulação do instante que se pretende estudar. O DesignBuilder permite importar os dados de saída da simulação e usá-los neste estudo.

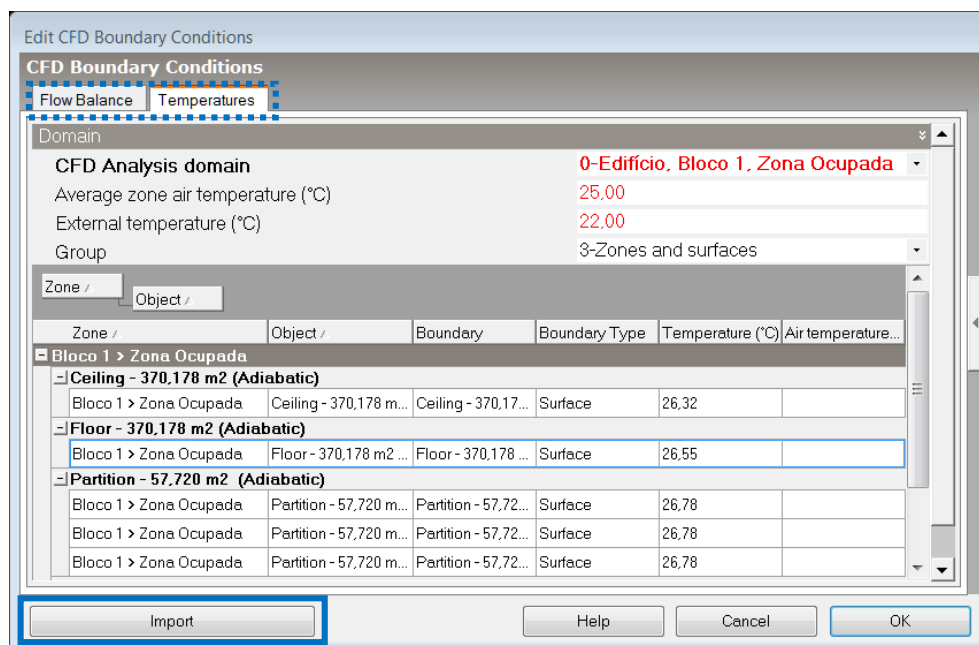


Fig. 3.6 – Separador “CFD Boundary Conditions Edit”

Os resultados da análise são apresentados na aba inferior “CFD”, na qual é possível personalizar os detalhes da simulação. O método de cálculo utilizado requer a criação de uma malha de nós (“grid”) para a definição geométrica do compartimento de modo a que o programa consiga aplicar o método dos elementos finitos na simulação. Quando se inicia uma análise CFD o programa cria uma malha de pontos automaticamente, identificando todos os vértices do modelo, sendo apenas necessário ao utilizador definir o espaçamento padrão entre as linhas da malha (“Default grid spacing”). A malha criada (ver Fig. 3.7) é uma grelha cartesiana, retilínea e não uniforme, o que significa que todas as linhas criadas são paralelas aos eixos principais do sistema cartesiano e que o espaçamento entre estas pode ser variável.

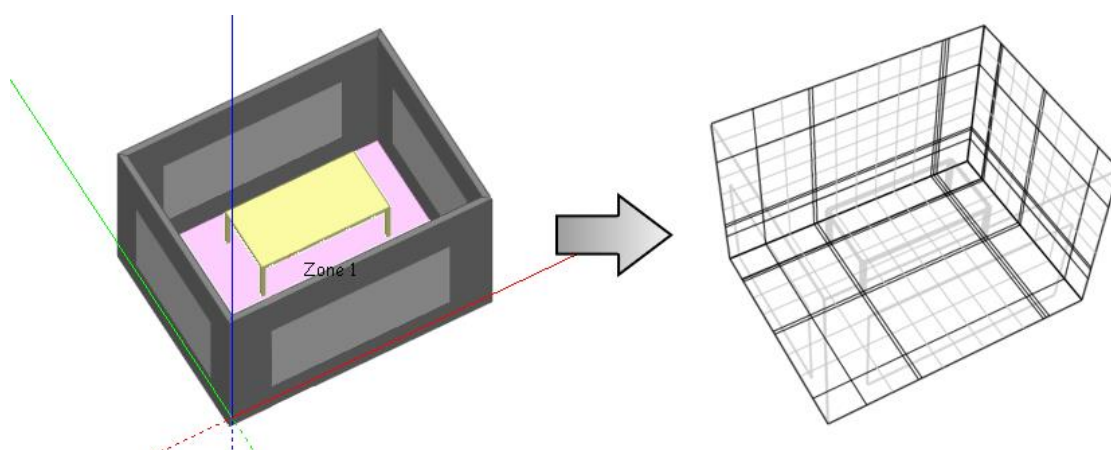


Fig. 3.7 – Criação de uma malha de nós para a análise CFD no DesignBuilder [adaptado de DesignBuilder (2013)]

### 3.2.3.7 Análise Paramétrica

O DesignBuilder tem a capacidade de fazer múltiplas simulações de forma automática e de condensar os resultados na forma de gráficos. É possível fazer variar até dois parâmetros e escolher um período de tempo personalizado para o programa realizar a análise paramétrica. As variáveis que é possível estudar dizem respeito a aspetos relacionados com a geometria do edifício (e.g. relação entre a área de parede e de envidraçado), com o tipo de materiais atribuídos a cada elemento (paredes, pavimentos, tetos e envidraçados) com as condições do ambiente interior (e.g. níveis de ocupação ou ganhos internos) e com as características dos diferentes equipamentos (equipamento de escritório, de ventilação e de climatização).

No caso das fachadas de dupla pele, é possível seleccionar um conjunto de tipos de vidro diferentes e utilizar o DesignBuilder para fazer um estudo paramétrico com o intuito de analisar a adequabilidade de diferentes combinações de vidro exterior e interior de uma determinada tipologia de FDP.

A forma de proceder para que o programa realize este tipo de análise começa pela edição do modelo do edifício. É crucial que os aspetos que se querem alterar estejam definidos no programa ao nível mais geral do “Edifício” (e não ao nível dos blocos ou das superfícies). De seguida, procede-se à simulação do período que se pretende estudar na aba “Simulation”. Por último, é necessário definir os aspetos que se querem fazer variar (e.g. tipo de vidro), os blocos ou elementos construtivos aos quais se irão aplicar essas alterações (e.g. superfície exterior do bloco correspondente à FDP) e os parâmetros a atribuir (e.g. vidro simples, vidro duplo, etc.) – ver Fig. 3.8.

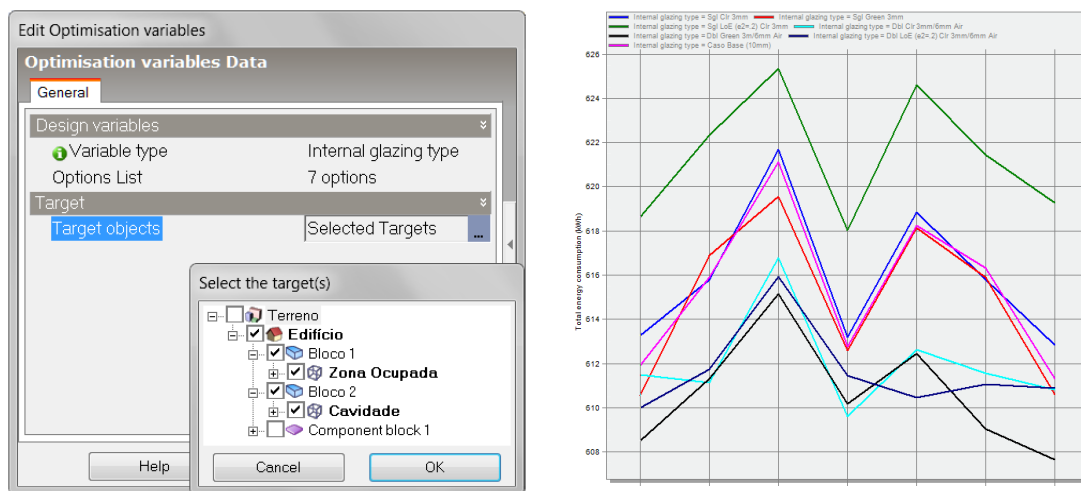


Fig. 3.8 – Painel de edição do modo de análise paramétrica (à esquerda) e exemplo de resultados (à direita)

## 3.3. CRIAÇÃO DO MODELO DE UMA FACHADA DE DUPLA PELE

De modo a realizar o estudo para aferir as qualidades das fachadas de dupla pele será primeiro necessário definir um modelo base a partir do qual serão feitas algumas alterações de modo a estudar o efeito da variação de determinados aspetos no desempenho global da fachada. Na criação deste modelo é necessário definir a geometria geral do edifício, a constituição dos diferentes elementos construtivos, as condições do ambiente exterior e interior, as características dos envidraçados, o tipo de ventilação e aspetos relacionados com a iluminação artificial do espaço interior.

Nos capítulos que se seguem será descrita a forma de proceder de modo a modelar de forma correta uma fachada de dupla pele no DesignBuilder, tendo como exemplo uma das tipologias de fachada a simular. Este subcapítulo foi elaborado tendo como base de informação os guias de ajuda do DesignBuilder (DesignBuilder 2013) e a experiência resultante da utilização do programa.

### 3.3.1 TIPOLOGIA

As fachadas de dupla pele podem ser caracterizadas segundo o tipo de ventilação que possuem, a geometria da cavidade e o percurso que o ar segue dentro desta. A título de exemplo, ao longo deste capítulo será demonstrado o conjunto de procedimentos a tomar para a correta modelação de uma fachada do tipo Corredor, com ventilação natural do tipo Cortina de Ar Exterior (CAE). Ao mesmo tempo, serão descritos e especificados um conjunto de parâmetros que se manterão constantes ao longo das restantes simulações.

### 3.3.2 GEOMETRIA

A definição da geometria de modelação de edifícios no DesignBuilder está dividida em seis níveis diferentes, organizados de forma hierárquica – ver Fig. 3.9. Uma alteração feita num nível superior é também aplicada aos subníveis seguintes. Isto permite não só fazer alterações ao nível do “Edifício”, que se refletem em todos os blocos que constituem o mesmo, como também personalizar aspetos individuais ao nível de cada zona ou superfície.

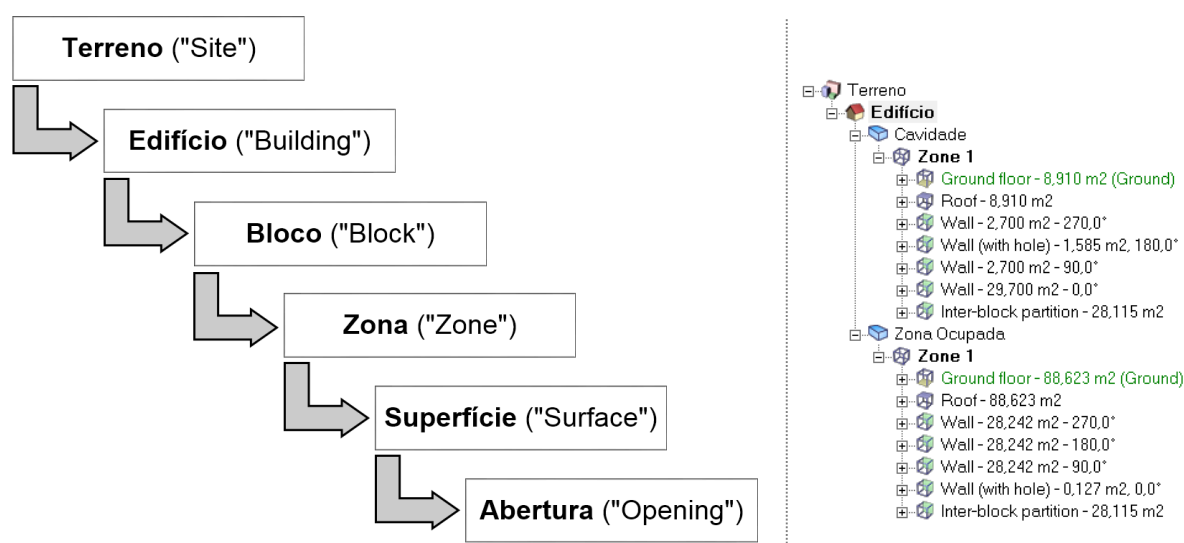


Fig. 3.9 – Hierarquia de elementos no programa DesignBuilder

Os blocos são a base da modelação do DesignBuilder e permitem definir a geometria do edifício a simular. Estes são criados a partir da extrusão de uma qualquer forma geométrica previamente desenhada no programa, podendo depois serem alteradas as suas dimensões e mudada a sua posição a qualquer momento. Para além de se poder unir e cortar blocos, é também possível proceder-se à divisão interna de um bloco em várias partições (“partitions”), que funcionam como as divisões internas dos compartimentos de um edifício.

Antes de se iniciar a modelação é necessário estabelecer as dimensões em planta e o pé direito do edifício a simular. Como as fachadas de dupla pele estão normalmente associadas a edifícios de escritório, opta-se uma altura entre pisos de 3 metros, que é o valor mínimo admissível pelo Regulamento Geral das Edificações Urbanas (RGEU 1951) para estabelecimentos comerciais. Quanto à área útil de pavimento, não existem regulamentos que definam de forma concreta as dimensões que o edifício deva tomar. A única imposição é, portanto, a de criar um modelo cujas dimensões não estejam muito desfasadas da realidade. Com esse objetivo em mente, analisou-se um conjunto de trinta edifícios com fachada de dupla pele, cujos dados foram recolhidos a partir do projeto BestFacade (Streicher 2005), iniciado em 2005 e com o objetivo de catalogar todos os edifícios com FDP construídos na Europa. Os resultados desta análise são os observáveis na Fig. 3.10. Dividiu-se esta análise em dois grupos: edifícios com somente uma fachada envidraçada (FDP) e edifícios com mais do que uma das fachadas envidraçadas. A disposição de pontos no gráfico demonstra que existe uma concentração de edifícios com a extensão da fachada principal entre os 20 e os 30 metros e com uma largura entre os 10 e os 20 metros. Com base nos resultados obtidos, escolheu-se modelar um edifício de planta quadrada, com 400 m<sup>2</sup> de área de pavimento (20 m x 20 m).

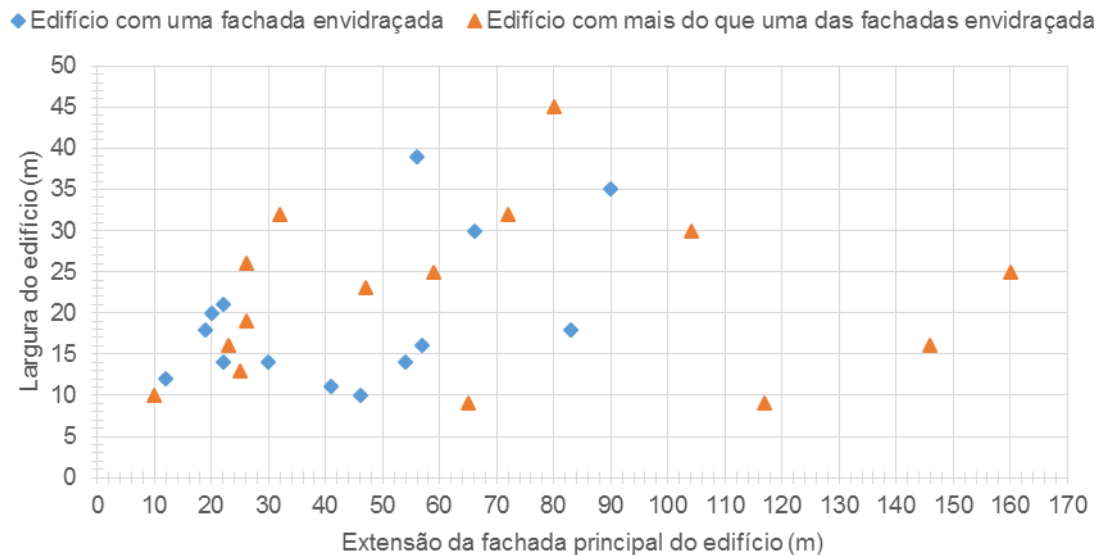


Fig. 3.10 – Relação entre a extensão da fachada principal e a largura de edifícios com FDP

Existem dois métodos no DesignBuilder para modelar fachadas de dupla pele. Um deles é a criação de uma sub-partição correspondente ao espaço da caixa de ar, dentro do bloco previamente desenhado. Para tal, é necessário selecionar o bloco em causa no painel lateral de navegação e ativar a ferramenta “Draw partition”. Em seguida, a partir da vista em planta, traça-se uma linha que divida o bloco atual em duas partes. Isto cria uma parede divisória e permite definir tipos de atividade e de ventilação distintos para cada uma das duas zonas – ver Fig. 3.11. A divisória, que por defeito é modelada como uma placa de gesso cartonado, pode ser alterada de modo a tomar a forma de um envidraçado com as características pretendidas.



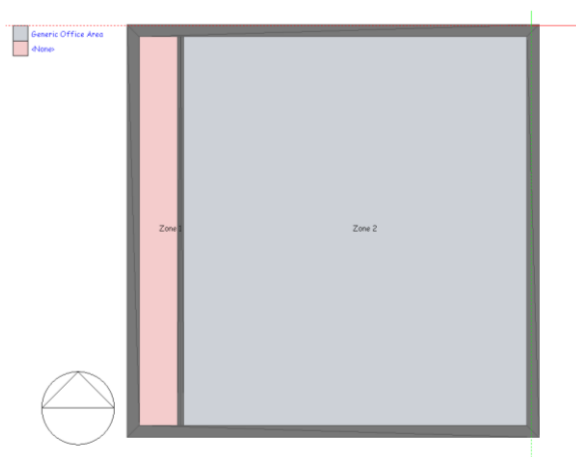


Fig. 3.11 – Método da sub-partição para a modelação de uma FDP no DesignBuilder

A segunda forma de modelar uma fachada de dupla pele no DesignBuilder é através da união de dois blocos, um correspondente à zona ocupada e outro relativo à cavidade e envidraçado exterior – ver Fig. 3.12. Este método tem a vantagem de se poder atribuir características visuais específicas a cada bloco, como a espessura das paredes. Para além disso, esta forma de modelar a cavidade é também a que permite uma maior liberdade, especialmente no que diz respeito às tipologias mais complexas, sendo a divisão em blocos muito útil no caso do desenho de fachadas com vários pisos, pois é possível copiar e colar blocos em qualquer altura.

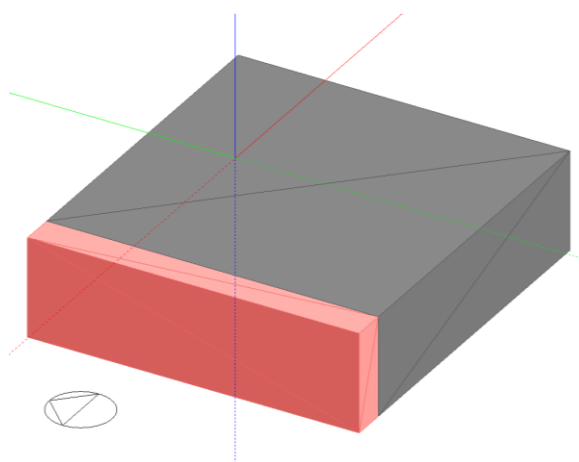


Fig. 3.12 – Método da união de blocos para a modelação de uma FDP no DesignBuilder

Este último será o método utilizado para fazer a modelação das fachadas estudadas, pois permite um controlo de forma mais independente e com maior capacidade de personalização da zona ocupada e da cavidade da fachada.

O primeiro passo na criação do edifício é modelar o bloco correspondente à zona ocupada, não sendo necessário desenhar desde logo o envidraçado interior pois, ao fazer a união dos dois blocos, este será apagado. De seguida, cria-se um outro bloco com a mesma largura e altura da parede em que vai ser aplicada a FDP. A profundidade deste bloco e a espessura das paredes são editáveis e dependentes das características pretendidas para a fachada. De modo a simular que este se trata de um edifício com vários

pisos, cria-se um bloco do tipo “Component block”, com superfícies adiabáticas que será colocado sob os elementos já existentes. Este elemento tem 6 metros de altura e uma área em planta igual à da zona ocupada (20 m x 20 m), fazendo com que a zona em estudo se passe a situar ao nível de um terceiro piso. Este passo é importante, não só para aumentar a influência da ação do vento (que aumenta com a altura do edifício), como também para mais tarde modelar as fachadas do tipo Chaminé e Multi-Piso, que requerem uma extensão vertical maior de modo a maximizar o efeito da ventilação natural.

Ao nível das superfícies de cada bloco, é ainda possível criar aberturas como janelas, portas, grelhas ou orifícios. Cada um destes componentes pode ser desenhado selecionando a superfície que se deseja modificar e escolhendo o comando correspondente na barra de ferramentas. Para modelar o envidraçado interior, aplica-se um vidro que preencha a totalidade da superfície de divisão dos dois blocos. No caso da envolvente exterior, é necessário desenhar o envidraçado e as grelhas que serão responsáveis pela ventilação da cavidade. Abrindo a aba “Visualise” é possível visualizar uma representação em 3D do modelo acabado de criar – ver Fig. 3.13.

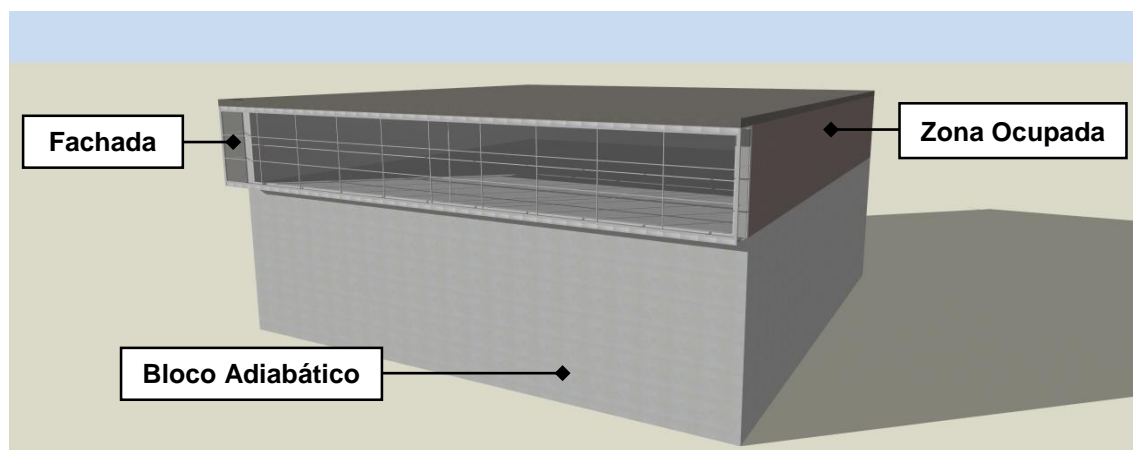


Fig. 3.13 – Representação 3D do modelo base de FDP modelado

### 3.3.3 MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO

O DesignBuilder traz consigo uma extensa biblioteca de materiais e de elementos construtivos predefinidos. É ainda possível editar os componentes existentes ou criar novos de raiz, especificando as características pretendidas – ver Fig. 3.14. Cada material possui informações acerca das suas propriedades físicas como a densidade ( $\text{kg/m}^3$ ), coeficiente de condutibilidade térmica ( $\text{W/m} \cdot ^\circ\text{C}$ ), calor específico ( $\text{J/kg} \cdot ^\circ\text{C}$ ), fator de resistência à difusão do vapor de água, emissividade e acerca do seu aspeto visual, como a rugosidade e cor ou textura com que é representado no programa. Os elementos construtivos como paredes, pisos e coberturas são compostos por um conjunto de materiais diferentes. Para criar um componente novo é necessário escolher o número de camadas e atribuir um material e uma espessura a cada uma delas.

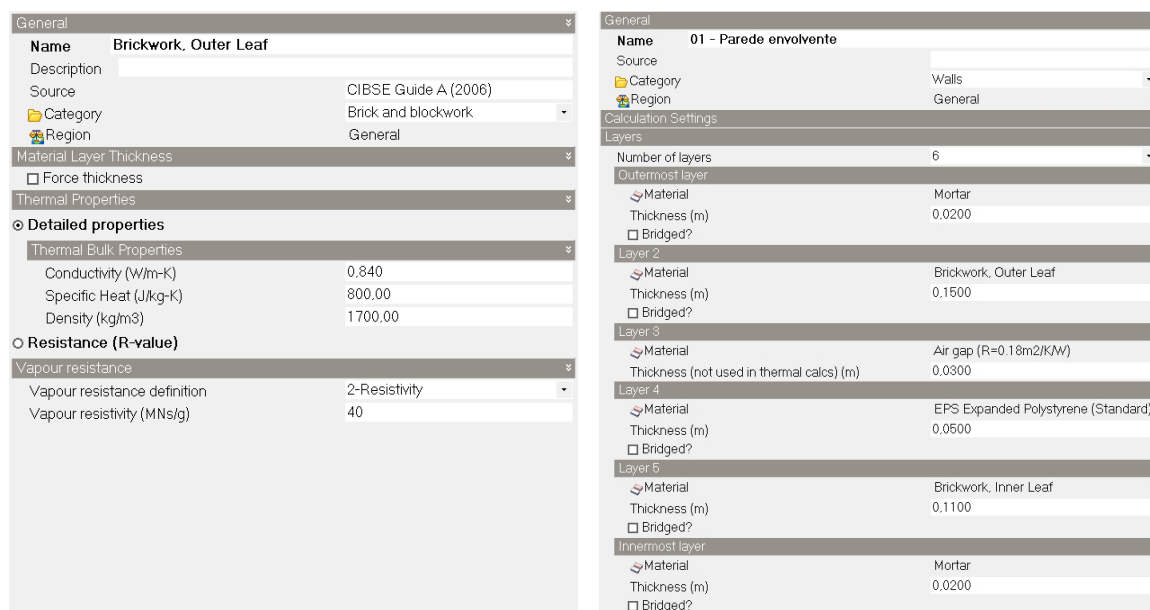
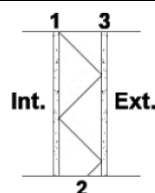


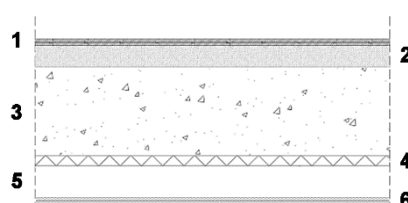
Fig. 3.14 – Edição de materiais (à esquerda) e de elementos construtivos (à direita) no DesignBuilder

A modelação e simulação que se está a efetuar no DesignBuilder tem como objetivo avaliar o efeito de diferentes tipologias de fachada de dupla pele na eficiência energética de um edifício. Como tal, é importante fazer com que a maior parte das trocas de calor ocorram através da fachada envidraçada. Assim, é admitido que o caso base a simular se trata de um piso intermédio de um edifício construído em banda. Esta situação hipotética faz com que não sejam apreciáveis as trocas de calor através da envolvente opaca. O DesignBuilder permite criar elementos adiabáticos, isto é, através dos quais não ocorre transmissão de energia térmica. Para isso, basta selecionar a superfície em causa e, na aba “Construction”, selecionar a opção “Adiabatic” para a adjacência. Importa referir que, ao classificar um elemento construtivo como sendo adiabático, este continua a contribuir para a inércia térmica do edifício, uma vez que o DesignBuilder apenas impede as trocas de calor na superfície exterior do componente, sendo ainda possível a acumulação de ganhos internos de calor por parte do elemento construtivo em causa.

Para além de questões relacionadas com a escolha do valor do coeficiente de transmissão térmica ( $U$ ) dos elementos construtivos, surge também a dúvida acerca de qual a inércia térmica a atribuir à envolvente opaca de modo a tornar a simulação o mais realista possível. Como as fachadas de dupla pele estão normalmente associadas a edifícios de escritório, de ocupação intermitente, opta-se por elementos construtivos com uma massa específica baixa e com isolamento térmico pelo interior, de modo a que a inércia térmica do edifício seja pouco elevada. Com este objetivo em mente e tomando partido da biblioteca de materiais incluída no DesignBuilder, criam-se elementos construtivos personalizados para as paredes exteriores, para a laje de pavimento/teto e para o suporte metálico do envidraçado. O critério de desenvolvimento destes componentes foi, por um lado, tentar que estes tenham uma inércia térmica pouco elevada e, por outro, fazer com que os seus coeficientes de transmissão térmica ( $U$ ) respeitem os valores máximos admissíveis para esta tipologia de edifícios. As características de cada um destes elementos vêm destacadas no Quadro 3.1.

Quadro 3.1 – Características da envolvente opaca do modelo base

Paredes exteriores		
Constituição:	1 – Placa de gesso cartonado 2 – Poliestireno expandido (EPS) 3 – Placa de fibrocimento	Representação esquemática
Espessura total:	16,0 cm	
Coef. transmissão térmica:	0,25 W/m².°C	

Laje de pavimento/teto		
Constituição:	1 – Piso plástico 2 – Camada de enchimento 3 – Laje de betão 4 – Poliestireno expandido (EPS) 5 – Espaço de ar 6 – Placa de gesso cartonado	Representação esquemática
Espessura total:	51,5 cm	
Coef. transmissão térmica:	0,34 W/m².°C	

### 3.3.4 AMBIENTE EXTERIOR

No DesignBuilder o clima exterior é definido a partir da escolha da localização do edifício, que corresponde a um ficheiro de dados climáticos predefinido. O programa conta com uma coleção de dados de diferentes países criados a partir de informação disponibilizada pela American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE), sendo também possível definir um clima personalizado. Estas bases de dados são criadas a partir de medições reais, recolhidas ao longo de vários anos diferentes e compiladas de modo a tentar criar um ano representativo.

Os dados climáticos horários referentes a locais em Portugal são fornecidos pelo Laboratório Nacional de Energia e Geologia (LNEG). O modelo correspondente a cada localização possui as seguintes informações:

- Localização geográfica (latitude, longitude, altitude);
- Fuso horário (fuso horário, hora de inverno/hora de verão);
- Dados climáticos (temperatura do ar, temperatura ponto de orvalho, humidade relativa, pressão atmosférica, radiação solar (direta e difusa), velocidade e direção do vento, precipitação média anual, graus-dia de aquecimento);
- Legislação local (valores regulamentares máximos do coeficiente de transmissão térmica (U) e da permeabilidade ao ar da envolvente (n50)).

Os dados climatéricos escolhidos para simular o modelo base dizem respeito à localização de Pedras Rubras, Porto, Portugal. Este local e o respetivo clima têm as seguintes características:

Quadro 3.2 – Características da localização selecionada para o modelo base

<b>Latitude:</b>	41,23°
<b>Longitude:</b>	-8.68°
<b>Altitude:</b>	73,0 m
<b>Graus dia de aquecimento (base 18 °C):</b>	1491 °C
<b>Temperatura mínima de inverno:</b>	0,0 °C
<b>Temperatura máxima de verão:</b>	32,0 °C

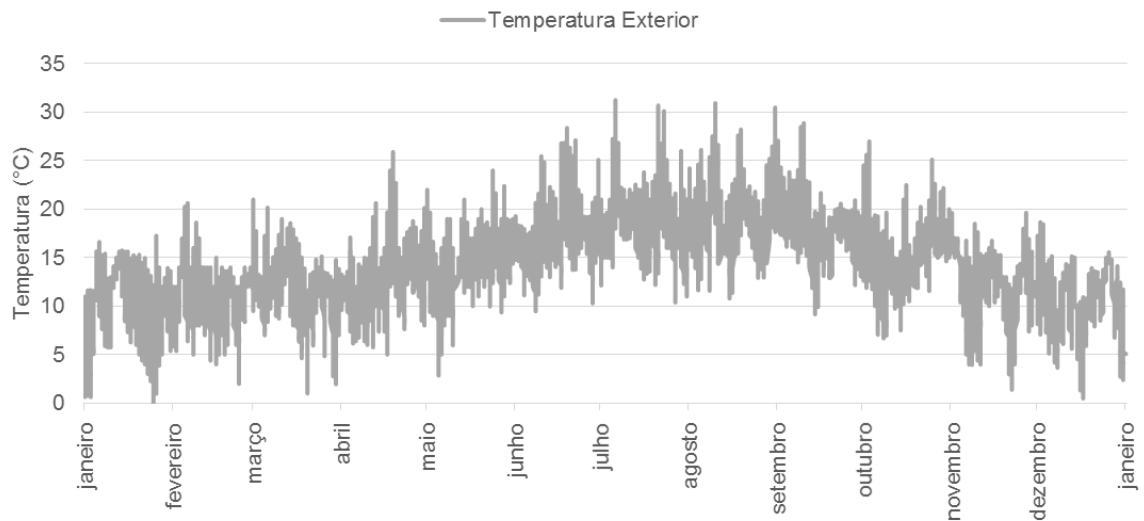


Fig. 3.15 – Variação anual da temperatura para o clima de Pedras Rubras, Porto

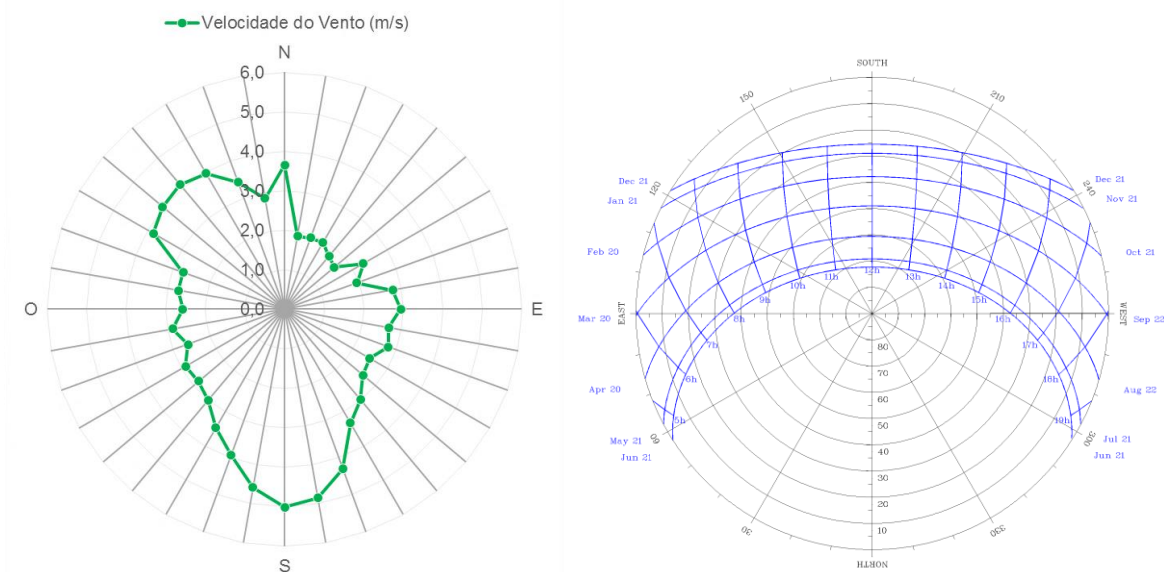


Fig. 3.16 – Velocidade média do vento para as várias orientações ao longo de um ano (à esquerda) e carta solar da cidade do Porto (à direita)

Para o caso base a ser analisado optou-se por orientar a fachada envidraçada para Sul de modo a maximizar o efeito dos ganhos solares e a conseguir uma melhor ventilação da cavidade, pois é esta a direção do vento mais predominante ao longo de todo o ano de simulação – ver Fig. 3.16.

### 3.3.5 AMBIENTE INTERIOR

As condições do ambiente interior são definidas no DesignBuilder a partir da aba “Activity”, podendo ser associado um tipo de atividade a cada compartimento, bloco ou partição. O programa permite caracterizar uma dada zona como:

- Padrão (“Standard”) – zona ocupada e com aquecimento e/ou arrefecimento;
- Semiexterior sem climatização (“Semi-exterior unconditioned”) – zona não ocupada e não climatizada (espaço não-útil);
- Cavidade (“Cavity”) – zona de cavidade, como o espaço de ar dentro de uma FDP ou de uma parede de trombe.
- Câmara Plena (“Plenum”) – zona sem climatização ou ventilação mecânica destinada à passagem de cabos e outras instalações, situada no espaço vazio dos tetos falsos.

Ao seleccionar uma destas opções, o programa permite escolher automaticamente um conjunto de valores que melhor se adequem ao tipo de zona definido. Por exemplo, no caso de se seleccionar a opção “Cavidade”, o programa pergunta ao utilizador se este deseja carregar os parâmetros padrão para a simulação de uma “Cavidade envidraçada”. Ao seleccionar “Sim”, o DesignBuilder faz as seguintes alterações ao projeto:

- O tipo de atividade atribuído à zona é “Nenhum”, correspondendo a um espaço não ocupado;
- São seleccionados de forma automática os algoritmos de cálculo mais adequados para calcular corretamente os coeficientes de transmissão térmica por convecção no interior de uma caixa de ar ventilada ( $h_{cv}$ ).

A opção “Cavidade” será escolhida para a simulação da fachada de dupla pele por ser a que melhor caracteriza o espaço de ar compreendido entre os dois vãos envidraçados.

Em seguida procede-se à especificação das condições do ambiente interior, para o qual é selecionada a opção “Standard”. O programa permite definir o tipo de ocupação, especificando o número de ocupantes por metro quadrado, o horário de utilização do espaço, entre outros parâmetros relacionados com o metabolismo, a taxa de libertação de dióxido de carbono e o tipo de vestuário dos utilizadores. Pelo facto de os exemplos simulados não corresponderem a edifícios reais, seleciona-se a opção “Generic Office Area”, cujos valores estabelecidos por defeito vão de encontro aos observados em edifícios de escritório correntes, nos quais é mais frequente a aplicação de fachadas de dupla pele. Este modelo define o valor da densidade ocupacional como 0,10 pessoas por metro quadrado, que é o valor recomendado para edifícios de escritório do tipo *open-plan* (Jiang et al. 2009). O caudal de ar fresco a fornecer aos ocupantes é definido como sendo 10 l/s, valor que está de acordo com os dados da “Chartered Institution of Building Services Engineers” (CIBSE 1999). O horário de funcionamento do edifício também fica desde logo estabelecido a partir do perfil de ocupação com as características enunciadas no Quadro 3.3, apresentado de seguida:

Quadro 3.3 – Distribuição da taxa de ocupação do edifício ao longo de um dia

Período	Hora	Taxa de ocupação
Dia de semana	00:00 – 07:00	0 %
	07:00 – 08:00	25 %
	08:00 – 09:00	50 %
	09:00 – 12:00	100 %
	12:00 – 14:00	75 %
	14:00 – 17:00	100 %
	17:00 – 18:00	50 %
	18:00 – 19:00	25 %
	19:00 – 24:00	0 %
Fim de semana	00:00 – 24:00	0 %

Importa referir que este horário apenas é utilizado pelo programa para as simulações anuais e de potência de arrefecimento, uma vez que para o cálculo da potência de aquecimento (“Heating Design”) não são considerados os ganhos internos devidos ao metabolismo dos ocupantes, ou seja, é estabelecida uma taxa de ocupação permanentemente igual a 0 %.

De modo a caracterizar o controlo da temperatura definem-se as temperaturas de *setpoint* máxima e mínima que o sistema de climatização do edifício deve garantir durante as horas de ocupação. Existe também a opção de especificar temperaturas limite para os períodos em que o edifício não tem ocupação (temperaturas de *setback*). Isto permite evitar condensações no envidraçado e que o edifício arrefeça demasiado durante a noite (situação de inverno) ou que o seu interior aqueça demasiado nos períodos de não ocupação (situação de verão), necessitando depois de uma maior potência de aquecimento ou arrefecimento no início do horário de funcionamento. Assim sendo, as temperaturas de *setpoint* de

aquecimento e de arrefecimento foram definidas como sendo 20 °C e 25 °C, respetivamente e as temperaturas de *setback* correspondentes como 15 °C e 30 °C. Estes valores manter-se-ão os mesmos ao longo de todas as simulações.

Ainda na aba “Activity” é possível indicar os ganhos internos devidos ao uso de equipamento de escritório ou outra qualquer fonte interna de calor, cujo valor de cálculo especificado pelo departamento de Energia dos E.U.A. é de 10 W/m<sup>2</sup> para escritórios (Jiang et al. 2009).

### 3.3.6 ABERTURAS

A aba “Openings” contém todas as opções relacionadas com as aberturas existentes no edifício, como janelas (interiores e exteriores), claraboias, portas e grelhas de ventilação. O programa é capaz de desenhar automaticamente os envidraçados do edifício, a partir dos valores da percentagem da envolvente envidraçada, altura, espaçamento e distância ao solo de cada janela, fazendo uma distribuição uniforme destas ao longo da envolvente do edifício. No presente caso, como se pretende um envidraçado que ocupe a totalidade da fachada em questão, seleciona-se a opção “5-Fill surface (100 %)” quer para o envidraçado exterior, quer para o envidraçado interior. Este último é editável a partir da componente “Inter-block partition”, que é uma superfície acessível quer através do bloco da zona ocupada, quer a partir do bloco da cavidade, correspondendo no entanto ao mesmo elemento.

Ainda na aba “Openings”, procede-se à escolha do tipo de vidro para a fachada de dupla pele. À semelhança do que acontece com os restantes elementos construtivos, para os envidraçados também é possível criar componentes como vidros duplos ou triplos, a partir da conjugação de múltiplos materiais – ver Fig. 3.17. A personalização de cada vidro é feita através da definição do seu fator solar ( $g_{t,vi}$ ), espessura, condutibilidade térmica ( $\lambda$ ) e transmissão luminosa. O programa analisa a composição de cada envidraçado e, conjugando as características individuais de cada pano de vidro, calcula o fator solar, transmissão luminosa e coeficiente de transmissão térmica totais do conjunto.

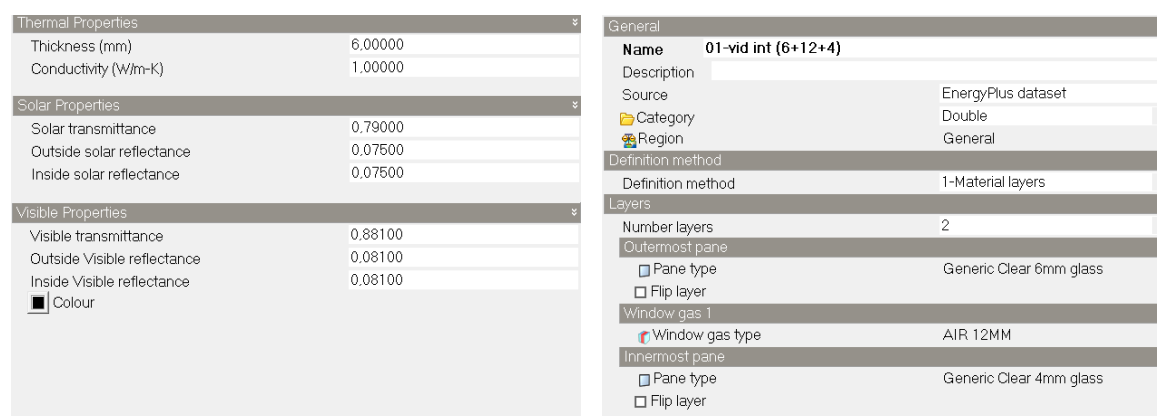


Fig. 3.17 – Edição de características do vidro (à esquerda) e de vidros duplos (à direita) no DesignBuilder

Para o modelo base que está a ser definido opta-se por um único tipo de vidro que será aplicado em toda a fachada e que mais tarde será alterado no decorrer da análise de sensibilidade. Assim, seleciona-se um vidro simples incolor para as fachadas interior e exterior, que ocupará a totalidade das superfícies em que está inserido. As características específicas deste tipo de vidro foram retiradas de um caso real do Edifício H do empreendimento Office Park Expo localizado no Parque das Nações, em Lisboa (Silva,



Pereira, e da Silva 2009), no qual a totalidade da envolvente exterior é constituída por fachadas de dupla pele. As características específicas do tipo de vidro utilizado no modelo base vêm expressas no quadro seguinte:

Quadro 3.4 – Características dos envidraçados da FDP do modelo base

Envidraçado interior/exterior	
Constituição:	Vidro simples incolor (10 mm)
Espessura total:	1,0 cm
Coef. transmissão térmica:	5,67 W/m <sup>2</sup> .°C
Fator solar:	0,794
Transmissão luminosa:	0,860

A inclusão de dispositivos de proteção solar é fundamental para o controlo dos ganhos solares, como tal adiciona-se um estore laminado padrão no interior da cavidade. O tipo de estore é completamente personalizável no DesignBuilder, sendo possível definir a distância do estore ao vidro, a largura e espessura das lâminas, o espaçamento entre estas e o ângulo que estas fazem com a horizontal. O funcionamento deste dispositivo será regulado em função da radiação solar incidente, sendo os estores ativados para intensidades de radiação solar incidente iguais ou superiores a 150 W/m<sup>2</sup>.

Em certos locais da fachada será necessária a introdução de grelhas de ventilação. Estas são desenhadas da mesma forma que as janelas e são caracterizadas por um horário de funcionamento e um coeficiente de descarga ( $C_d$ ). É definido um funcionamento em contínuo para todas as grelhas e um valor de  $C_d$  igual a 0,60, que é um valor normalmente associado a este tipo de componentes (Hult, Iaccarino, e Fischer 2012). A título de exemplo, cada grelha terá uma área correspondente a 5 % da área do envidraçado em que se encontra inserida, estando estas dispostas ao longo da totalidade da largura da fachada, à semelhança do que é observável em vários edifícios construídos com FDP (e.g. Edifício H – Office Park Expo) (Silva, Pereira, e da Silva 2009).

### 3.3.7 VENTILAÇÃO E SISTEMA DE AVAC

A aba “HVAC” é de grande importância pois é com base nesta que irão ser calculadas as necessidades de energia para aquecimento e arrefecimento do edifício. É possível escolher o tipo de ventilação (natural, mecânica ou ambas) e definir valores característicos do sistema de aquecimento e arrefecimento para cada zona. No DesignBuilder existem três modos de modelar os sistemas de AVAC (simples, compacto ou avançado) e três formas de dimensionamento (adequado, manual ou automático). Os modos “simples” e “automático” serão selecionados, pois permitem calcular de forma automática um sistema de AVAC que garanta as temperaturas de *setpoint* e de *setback* definidas.

Para a zona ocupada opta-se por uma ventilação mecânica em que o caudal a ventilar é calculado em função do ar fresco mínimo necessário por ocupante por segundo estabelecido na aba “Activity” e da densidade ocupacional atribuída ao espaço, através da seguinte fórmula:

$$Q_{\text{ventilação}} = CM0 \times Ocup \times AComp \quad (3.10.)$$

$Q_{\text{ventilação}}$  – Caudal a ventilar [l/s]

$CM0$  – Caudal mínimo por ocupante [(l/s)/pessoa]

$Ocup$  – Número de ocupantes por metro quadrado [pessoas/m<sup>2</sup>]

$AComp$  – Área do compartimento [m<sup>2</sup>]

Para os equipamentos de aquecimento e arrefecimento é possível seleccionar a fonte de energia e o respetivo COP (“Coefficient Of Performance”) e EER (“Energy Efficiency Ratio”), respetivamente. Os valores definidos para estes dois parâmetros não são fulcrais para o desenvolvimento das diversas simulações. De facto, os valores de saída da energia de aquecimento e arrefecimento representam a energia que é necessária fornecer ao ar do espaço interior para atingir o equilíbrio do sistema e não a energia que é requerida pelos diversos sistemas de climatização.

Na zona da cavidade não existe nenhum sistema de climatização, estabelecendo-se apenas a ventilação com sendo natural. Desta forma, dependendo da área e da disposição das aberturas, o programa irá calcular o fluxo de ar que atravessa cada grelha e apresentar o valor das renovações horárias de ar na cavidade devido à ação do vento e ao efeito chaminé.

### 3.3.8 ILUMINAÇÃO

A aba “Lighting” permite ao utilizador controlar a iluminação do ambiente interior e da vizinhança exterior (quando editada no nível do “Building”). É possível particularizar o tipo de dispositivo, a potência iluminada (em W/m<sup>2</sup>) e o horário de funcionamento da iluminação artificial. Para além disso, existem parâmetros como a fração visível, a fração radiada e a fração de convecção que ajudam a caracterizar o tipo de iluminação e os ganhos internos originários desta.

Os níveis de iluminação ideais são definidos como 400 lux, que é o valor recomendado pela Illuminating Engineering Society of North America (2000) para edifícios de escritório do tipo *open-plan*. É seleccionada a opção “Lighting Control” que faz com que a iluminação artificial apenas seja ativada quando a intensidade luminosa exterior não for suficiente para garantir os níveis de iluminação estabelecidos. Aos ganhos internos devidos à iluminação corresponde um ganho máximo de 12 W/m<sup>2</sup>, na total ausência de luz natural.

## 3.4. TIPOS DE RESULTADOS

Concluída a modelação e parametrização do caso de estudo, é possível usar o DesignBuilder para simular o edifício e obter alguns dados acerca do seu comportamento higratérmico.

Existem três modos de simulação possíveis:

- Potência de aquecimento (“Heating design simulation”)
- Potência de arrefecimento (“Cooling design simulation”)
- Simulação anual (“Simulation using hourly weather data”)

Para cada um destes tipos de simulação é possível definir os parâmetros que se pretende que sejam exibidos pelo programa, assim como o modo de apresentação destes (gráfico, tabela ou folha de cálculo). O DesignBuilder não apresenta por defeito os resultados do cálculo das temperaturas superficiais dos elementos que constituem o modelo. Estes valores são interessantes para estudar a variação da temperatura transversalmente ao longo da fachada de dupla pele. Para que o programa apresente estes valores, é necessário seleccionar as superfícies ou aberturas em questão no menu de navegação lateral e, na aba “Dados de saída” (“Outputs”), seleccionar a opção “Guardar dados de saída da superfície” (“Store surface output”). Com isto, surge uma lista de variáveis que é possível apresentar aquando concluídas as diversas simulações.

#### 3.4.1 POTÊNCIA DE AQUECIMENTO

Este modo de simulação faz o dimensionamento para as piores condições de inverno possíveis, para a região em que o edifício se encontra inserido. A simulação é executada com as seguintes características:

- Temperatura exterior constante;
- Velocidade e direção do vento constantes;
- Ausência de ganhos solares e de ganhos internos;
- Sistema de aquecimento permanentemente ativo, de modo a garantir a temperatura de *setpoint* definida pelo utilizador.

A temperatura exterior para esta simulação é definida ao nível do terreno (“Site”) na aba “Location” e a temperatura de *setpoint* é indicada na aba “Activity”. Os resultados são apresentados quando o fluxo de calor e as temperaturas de cada compartimento convergirem.

A simulação calcula as necessidades de aquecimento para manter a temperatura interior desejada e quantifica também as perdas de calor que se dão através de cada elemento (janelas, paredes, etc.). Os resultados da simulação de potência de aquecimento são os seguintes:

- Temperatura do ar no interior (média das temperaturas dos diferentes compartimentos);
- Temperatura média radiante (média pesada das temperaturas das superfícies envolventes do espaço onde se encontram as pessoas e inclui o efeito da radiação solar incidente);
- Temperatura operativa (temperatura uniforme de um contorno radiante negro com o qual um ocupante trocava a mesma quantidade de calor por radiação e convecção que troca com o ambiente não uniforme em que está inserido);
- Temperatura de bulbo seco (temperatura média do ar exterior medida por um termómetro exposto ao ar, mas protegido da humidade e da radiação solar);
- Trocas pelos envidraçados, paredes, partições, cobertura, pavimento, por portas e grelhas, por infiltração de ar e devido a ventilação mecânica e natural.

A representação destes resultados em forma gráfica toma a seguinte forma:



Fig. 3.18 – Exemplo de resultados da simulação de potência de aquecimento

A representação das temperaturas e das trocas de calor é feita na forma de gráficos de barras. As temperaturas são apresentadas em graus Celsius (°C) e as trocas de calor em quilowatt (kW), sendo que os valores negativos representam perdas de calor para o exterior e os valores positivos traduzem ganhos de calor.

### 3.4.2 POTÊNCIA DE ARREFECIMENTO

A simulação de potência de arrefecimento é semelhante à de potência de aquecimento no sentido em que também são consideradas condições extremas para o dimensionamento. Neste caso, as simulações referem-se à estação de arrefecimento e são executadas com as seguintes características:

- Temperatura exterior constante;
- Ausência da ação do vento;
- Inclui ganhos solares através de envidraçados e por ventilação natural;
- Consideração da transmissão de calor por condução e convecção entre compartimentos com diferentes temperaturas.

Como esta simulação inclui os ganhos solares, os seus resultados gráficos são apresentados de forma diferente do que os da simulação de potência de aquecimento. Como os ganhos solares variam ao longo do dia, os gráficos passam a ser de linha e representam a totalidade das 24 horas de um dia extremo de dimensionamento. Para além dos valores da temperatura do ar, temperatura média radiante, temperatura operativa, temperatura de bulbo seco e trocas térmicas através de cada elemento (que também eram apresentados na simulação anterior) são apresentados também os seguintes parâmetros:

- Ganhos térmicos (interiores e exteriores);
- Potência de arrefecimento (sensível);

- Humidade relativa do ar;
- Renovações horárias de ar devido à ventilação mecânica, natural e infiltrações.

A representação destes resultados em forma gráfica toma a seguinte forma:

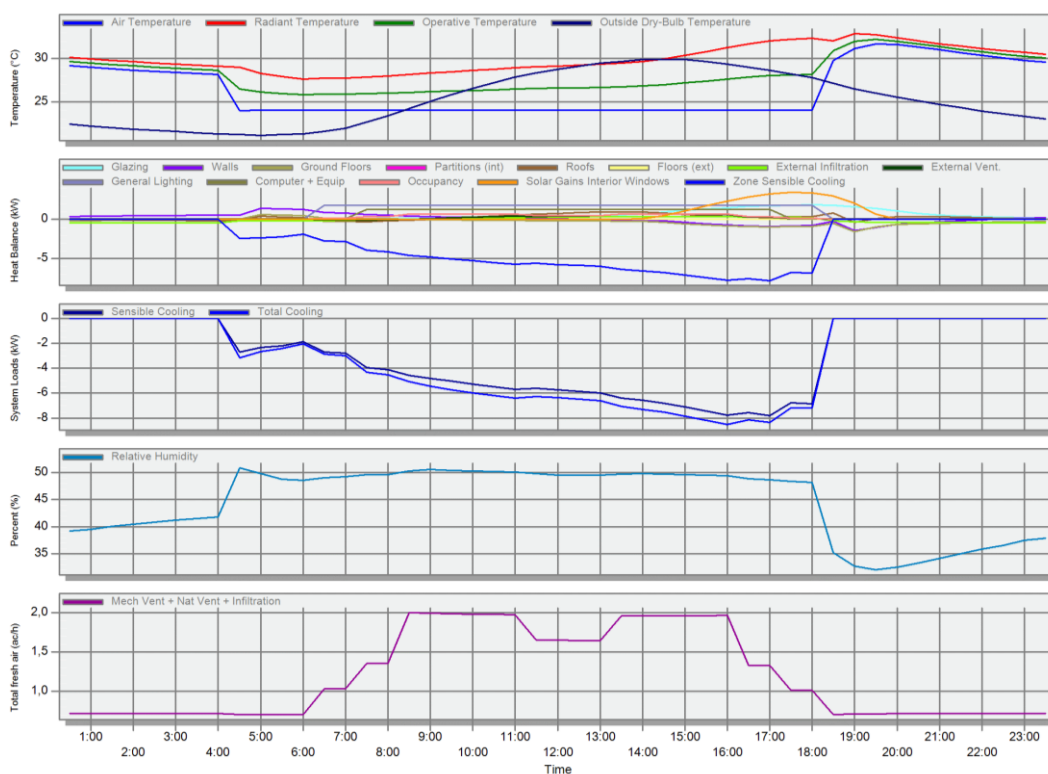


Fig. 3.19 – Exemplo de resultados da simulação de potência de arrefecimento

### 3.4.3 SIMULAÇÃO ANUAL

Este tipo de simulação utiliza os dados climáticos típicos de uma região para simular um intervalo de tempo personalizado. Esse intervalo pode ser anual, mensal, diário, horário ou sub-horário (até a um máximo de 60 intervalos de 1 minuto por hora). O programa fornece alguns dos intervalos de simulação predefinidos:

- “Anual” – de 1 de janeiro a 31 de dezembro;
- “Meses mais frios” – de 1 de outubro a 31 de março
- “Semana crítica de inverno” e “Semana típica de inverno” – de 22 a 28 de janeiro e de 29 de janeiro a 4 de fevereiro, respetivamente;
- “Meses mais quentes” – de 1 de abril a 30 de setembro;
- “Semana crítica de verão” e “Semana típica de verão” – de 5 a 11 de agosto e de 15 a 21 de julho, respetivamente.

Este módulo de simulação é mais completo comparativamente com os dois descritos anteriormente e possui as seguintes características:

- Variação horária da temperatura segundo os dados climatéricos horários da região – ver 3.3.4;
- Ganhos térmicos (interiores e exteriores) considerados ao longo da totalidade da simulação;
- Ação do vento variável conforme os dados climáticos;
- Consideração da transmissão de calor por condução e convecção entre compartimentos com diferentes temperaturas;
- Consideração dos horários de funcionamento estabelecidos para dispositivos de sombreamento, grelhas, sistemas de climatização e abertura de janelas.

Os dados de saída deste tipo de simulação são apresentados com recurso a um gráfico relativo ao intervalo escolhido – ver Fig. 3.20. Os parâmetros que são possíveis retirar são os seguintes:

- Consumo de energia (equipamentos, iluminação, aquecimento, arrefecimento, água quente sanitária);
- Temperaturas (temperatura do ar no interior, temperatura média radiante, temperatura operativa, temperatura de bulbo seco);
- Transferência de calor pelos diferentes elementos construtivos;
- Climatização (energia de arrefecimento e de aquecimento);
- Ventilação (renovações horárias de ar devidas a ventilação natural e mecânica).

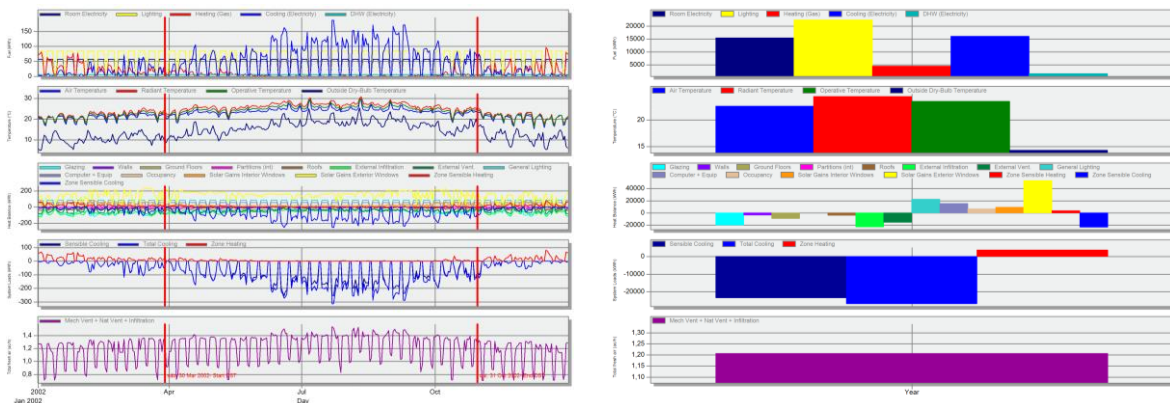


Fig. 3.20 – Exemplo de resultados da simulação anual

### 3.5. SÍNTESE DO CAPÍTULO

De forma a organizar as descrições feitas ao longo do Capítulo 3 relativamente ao edifício que vai ser simulado, as características gerais do modelo base foram sintetizadas no Quadro 3.5.

Quadro 3.5 – Síntese das características definidas para o modelo base

Geometria	
Área útil:	400 m <sup>2</sup> (20 m x 20 m)
Pé direito:	3 m
Cota do piso em estudo:	6 m (3º piso)
Materiais	
Paredes exteriores:	Espessura = 16,0 cm Coef. transmissão térmica = 0,25 W/m <sup>2</sup> .°C (adiabática)
Pavimento / Teto:	Espessura = 51,5 cm Coef. transmissão térmica = 0,34 W/m <sup>2</sup> .°C (adiabático)
Envidraçado:	Espessura total = 10 mm Coef. transmissão térmica = 5,67 W/m <sup>2</sup> .°C Fator solar = 0,794 Transmissão luminosa = 0,860
Ambiente exterior	
Localização geográfica:	Pedras Rubras, Porto, Portugal Latitude: 41,23° Longitude: -8.68° Altitude: 73,0 m
Orientação da fachada envidraçada:	Sul
Controlo dos ganhos solares:	Ativação dos dispositivos de sombreamento: $R_{solar} \geq 150 \text{ W/m}^2$
Ambiente interior	
Zona ocupada:	Temperatura <i>setback</i> de aquecimento: 15 °C Temperatura <i>setpoint</i> de aquecimento: 20 °C Temperatura <i>setpoint</i> de arrefecimento: 25 °C Temperatura <i>setback</i> de arrefecimento: 30 °C Ocupação: 0,10 ocupantes/m <sup>2</sup> Equipamento de escritório: 10 W/m <sup>2</sup> Iluminação: 400 lux → 12 W/m <sup>2</sup>
Ventilação	
Zona ocupada:	Tipo de ventilação: Mecânica (10 l/s por pessoa)





# 4

## CENÁRIOS DE SIMULAÇÃO

### 4.1. ENQUADRAMENTO

No presente capítulo serão descritos os diferentes casos de estudo a ser modelados no DesignBuilder. Inicialmente será feita uma introdução ao caso base de simulação, correspondente a um edifício com uma fachada de vidro simples, cujos resultados servirão como base de comparação. Ao modelo base inicial serão aplicados diferentes tipologias de FDP. Testar-se-ão diversos tipos de ventilação, aspetos relacionados com a geometria da fachada, com a área das aberturas e com o tipo de vidro usado em cada uma das duas faces. De seguida, será feita uma análise de sensibilidade em que se procura compreender melhor a adequabilidade deste tipo de fachadas para várias orientações solares e em diferentes climas e como é que os ganhos internos afetam a performance geral do edifício. O objetivo geral destas simulações é aferir se de facto a opção por uma fachada de dupla pele se traduz numa poupança das necessidades de climatização associadas a um edifício e em que circunstâncias é que a sua aplicação é efetivamente vantajosa.

### 4.2. MODELO BASE

O modelo base, cujos resultados servirão como ponto de partida para a comparação das várias tipologias de fachada de dupla pele, diz respeito a um piso intermédio de um edifício com 400 m<sup>2</sup> de área útil, localizado na cidade do Porto – ver Fig. 4.1.

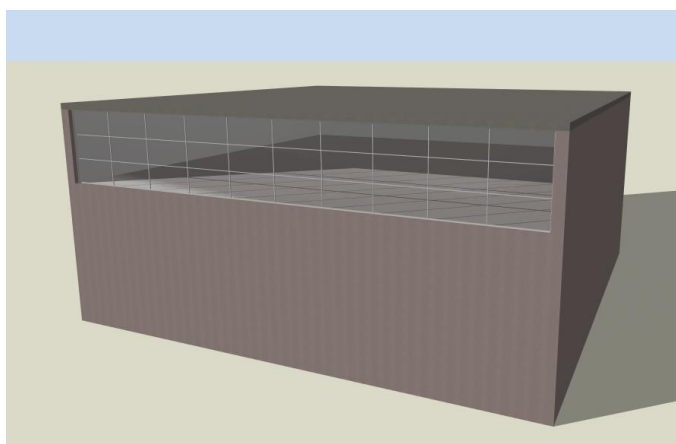


Fig. 4.1 – Representação 3D do caso base modelado no DesignBuilder

Este modelo, assim como alguns dos que serão descritos mais à frente, será simulado com uma única fachada totalmente envidraçada, orientada a Sul. A opção pela modelação de um edifício com apenas uma fachada envidraçada (sendo as restantes opacas e consideradas adiabáticas) justifica-se, não só pelo facto de os resultados referentes a múltiplas fachadas serem facilmente extrapolados a partir desta simulação inicial, mas também pela necessidade de simplificar ao máximo o modelo base, de modo a agilizar todo o processo de simulação e diminuir a probabilidade de ocorrência de erros de cálculo no DesignBuilder.

### **4.3. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DAS FDP**

Após a simulação do modelo base, dar-se-á início à modelação e simulação das diferentes tipologias de fachada de dupla pele. De modo a que este estudo seja o mais completo possível, será simulado um elevado número de FDP, combinando as três categorias de classificação já discutidas: geometria, tipo de ventilação e percurso do fluxo de ar na cavidade. O facto de o DesignBuilder considerar que a ventilação mecânica é sempre feita com recurso a ar exterior, impossibilita a escolha deste tipo de ventilação para as fachadas do tipo Cortina de Ar Interior (CAI) e Exaustão de Ar (EA), nas quais a cavidade é ventilada com recurso a ar proveniente do interior do edifício. Como tal, apenas serão simuladas fachadas com ventilação natural.

#### **4.3.1 GEOMETRIA**

A simulação de fachadas com diferentes tipos de geometria tem como objetivos principais:

- Avaliação da influência da geometria da fachada na sua performance térmica;
- Análise da diferença entre os valores dos ganhos solares para diferentes geometrias;
- Quantificação das perdas de calor através do envidraçado para cada geometria;
- Estudo da variação da temperatura média do ar no interior da cavidade da FDP.

As fachadas de dupla pele simuladas serão do tipo Confinada, Corredor, Chaminé e Multi-Piso. A descrição da modelação de uma fachada do tipo Corredor no DesignBuilder já foi feita no capítulo anterior. A modelação das restantes geometrias de fachada é realizada de forma semelhante, possuindo no entanto algumas particularidades:

- Fachada Confinada: É necessário acrescentar partições internas ao nível do bloco exterior que diz respeito à cavidade ventilada. Estas partições devem ser completamente envidraçadas, de modo a que os ganhos solares sejam semelhantes aos das restantes tipologias e que as necessidades energéticas de climatização sejam comparáveis;
- Fachada Chaminé: Este tipo de fachada tem uma geometria mais complexa e é por isso mesmo mais difícil de simular no DesignBuilder. O método escolhido para a sua modelação foi a divisão em blocos verticais correspondentes a zonas de “coluna de ventilação” (que se estenderão ao longo da totalidade da altura do edifício) e em zonas de “caixa” (que ocuparão apenas a área do piso que está a ser simulado). É necessário também assegurar as ligações para a circulação de ar entre estes dois blocos através da inclusão de orifícios quadrados nas superfícies divisórias entre estes elementos. Mais uma vez, todas as superfícies de separação entre os diferentes blocos devem ser totalmente envidraçadas de modo a diminuir a diferença entre os ganhos solares obtidos na simulação das diferentes tipologias;

- **Fachada Multi-Piso:** A sua simulação segue o mesmo processo que as do tipo Corredor, com a exceção que a sua caixa de ar se prolonga ao longo de vários pisos. De modo a tirar proveito do efeito chaminé, é simulado um edifício com 5 pisos, tendo assim a fachada envidraçada 15 metros de altura, à semelhança do que é feito para a fachada Chaminé.

A representação das quatro geometrias de FDP modeladas no DesignBuilder é apresentada na figura seguinte:

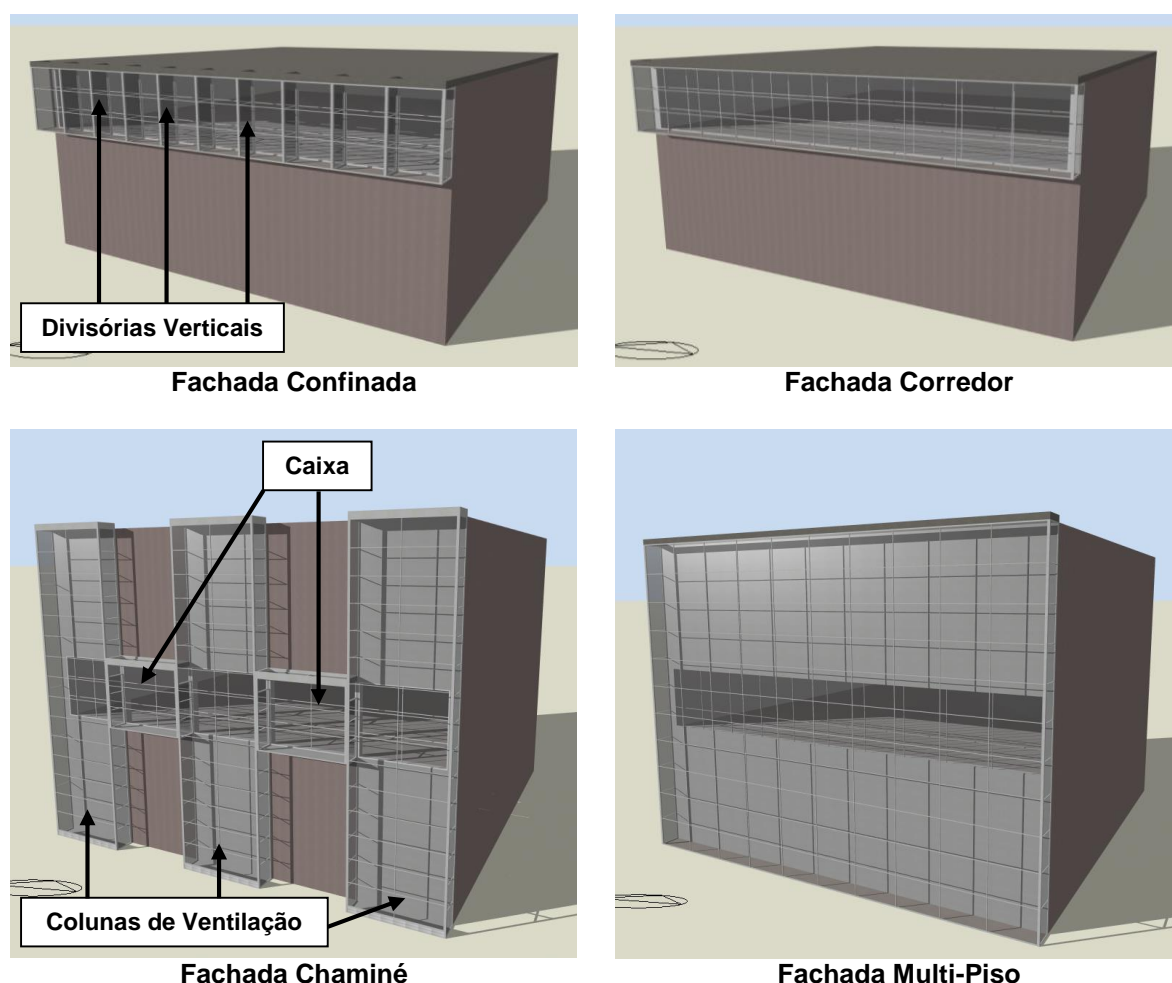


Fig. 4.2 – Diferentes geometrias de fachada simuladas no DesignBuilder

A alteração da geometria da cavidade da fachada modifica a forma como a radiação solar é transmitida até ao interior do edifício e tem também influência na forma como a caixa de ar é ventilada. Aumentar o número de divisórias interiores da fachada faz variar o número de vãos envidraçados que a radiação solar terá de atravessar até ser transmitida ao interior. Deste modo, a radiação solar transmitida ( $R_{\text{solar}}$ ) será necessariamente diferente entre fachadas com poucas divisórias (e.g. Corredor ou Multi-Piso), relativamente às mais compartimentadas, como é o exemplo das fachadas do tipo Confinada e Chaminé. Por outro lado, as fachadas com uma cavidade ventilada sem divisórias horizontais que se estenda por múltiplos pisos (e.g. Chaminé ou Multi-Piso) terão um caudal de ventilação maior devido ao efeito chaminé, comparativamente com fachadas que são compartimentadas ao nível de cada piso. A

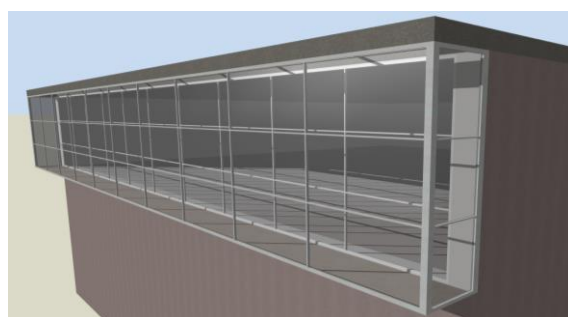
equação 3.9. demonstra bem esta situação: quanto maior a distância do ponto médio da abertura relativamente ao eixo neutro ( $H'$ ), maior será o caudal de ar que atravessa a cavidade ( $Q_{\text{chaminé}}$ ).

#### 4.3.2 PERCURSO DO FLUXO DE AR NA CAVIDADE

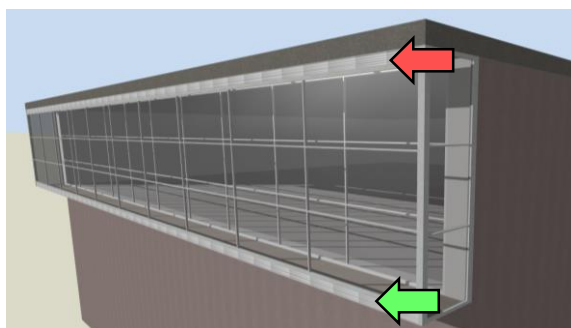
A simulação de fachadas com diferentes tipos de percurso do fluxo de ar tem como objetivos principais:

- Avaliação da influência do percurso do fluxo de ar na performance térmica de uma fachada;
- Análise dos caudais de ventilação para cada tipo de percurso do fluxo de ar;
- Estudo da variação da temperatura média do ar no interior da cavidade da FDP.

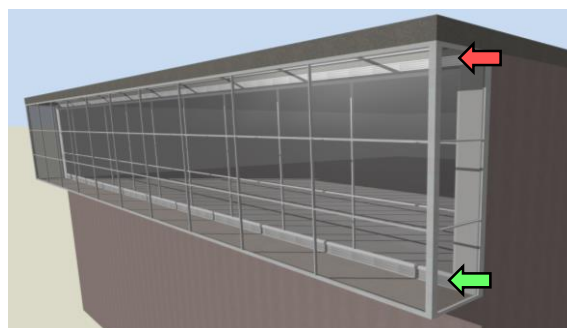
A simulação dos diferentes tipos de percurso do fluxo de ar na cavidade é feita no DesignBuilder através da escolha da posição das grelhas de ventilação na fachada – ver Fig. 4.3.



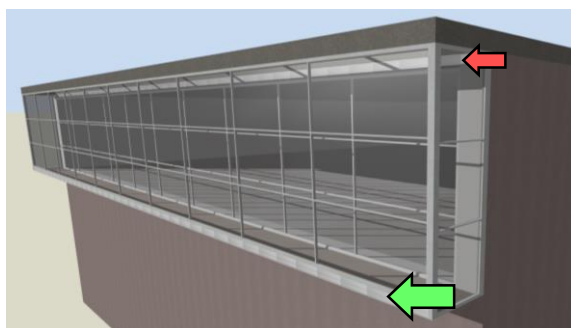
**Tampão (Tp)**



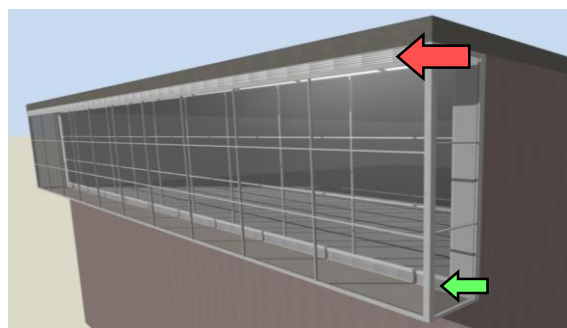
**Cortina de Ar Exterior (CAE)**



**Cortina de Ar Interior (CAI)**



**Admissão de Ar (AA)**



**Exaustão de Ar (EA)**



Admissão de ar na cavidade



Exaustão de ar da cavidade

Fig. 4.3 – Diferentes tipos de percurso do fluxo de ar na cavidade simulados no DesignBuilder

Como já foi discutido, estas grelhas apenas são caracterizadas no programa pelo seu coeficiente de descarga ( $C_d$ ) e horário de abertura ou ativação. Não é, portanto, possível selecionar grelhas de ventilação que permitam que o fluxo de circulação do ar se proceda numa só direção. Isto é problemático na modelação das fachadas do tipo Exaustão de Ar (EA) e Admissão de Ar (AA), pois em ambos os casos as grelhas de ventilação poderão servir para admissão e para exaustão de ar, não correspondendo ao funcionamento ideal apresentado na bibliografia estudada (Oesterle, Lieb, e Green 2001). De qualquer forma, estas tipologias de FDP serão também simuladas no DesignBuilder, podendo no entanto os seus resultados estar um pouco desfasados da realidade.

A alteração do tipo de percurso do fluxo de ar faz variar a contribuição da ação do vento ( $Q_{\text{vento}}$ ) e do efeito chaminé ( $Q_{\text{chaminé}}$ ) na ventilação global da fachada. A ação do vento apenas é considerada na simulação de fachadas do tipo Cortina de Ar Exterior (CAE), Admissão de Ar (AA) e Exaustão de Ar (EA), enquanto que o efeito chaminé é condicionante em todas as tipologias. Por último, importa referir que o caudal de ventilação da cavidade é influenciado não só pelo tipo de ventilação definido, mas também pela geometria da fachada.

#### 4.3.3 ESPESSURA DA CAVIDADE

A simulação de fachadas com diferentes espessuras de caixa de ar tem como objetivos principais:

- Avaliação da influência da espessura da cavidade na performance térmica de uma fachada;
- Quantificação dos caudais de ventilação para espessuras de caixa de ar diferentes.

Um dos aspetos que influencia o funcionamento de uma fachada de dupla pele é a espessura da sua cavidade. Será, portanto, feita uma análise ao funcionamento de uma fachada de dupla pele para uma espessura da cavidade de 25, 50 e 100 centímetros (ver Fig. 4.4) e os seus resultados discutidos no capítulo seguinte.

A variação da espessura da cavidade terá aproximadamente o mesmo efeito nas diferentes geometrias de fachada. Como tal, de forma a reduzir o número de simulações a realizar, apenas será simulada a tipologia Corredor e todos os diferentes esquemas de ventilação a esta associados.

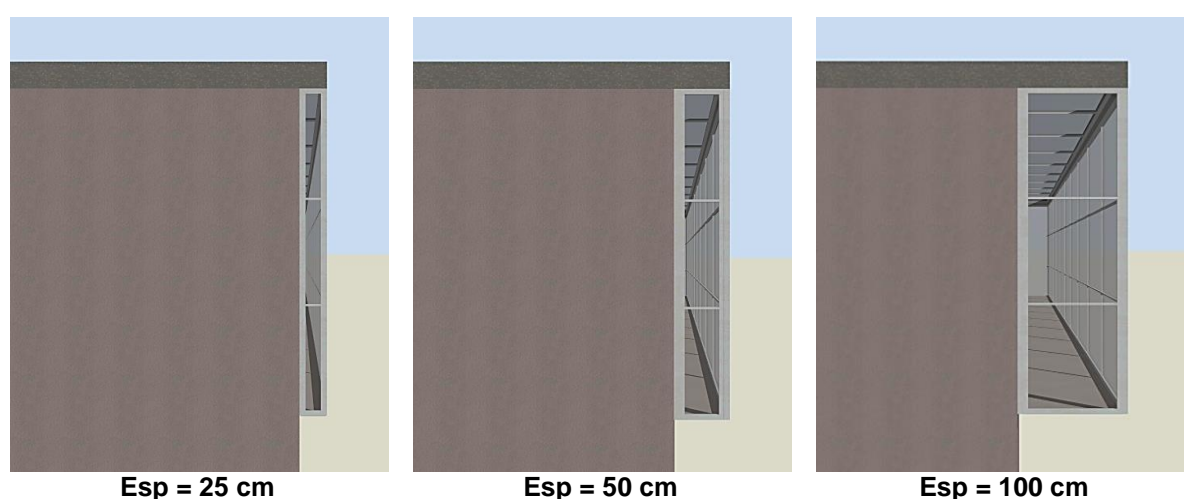


Fig. 4.4 – Diferentes espessuras da cavidade de ar simuladas no DesignBuilder

A variação da espessura da caixa de ar (s) fará alterar os valores do coeficiente de transmissão térmica por convecção dentro da cavidade ( $h_{cv}$ ), o que se traduzirá numa alteração da temperatura do ar no seu interior e, consequentemente, nas trocas de calor com o a zona ocupada. Para além disso, as alterações feitas ao nível da cavidade poderão ter influência na velocidade de circulação do ar no seu interior.

#### 4.3.4 ÁREA DAS GRELHAS DE VENTILAÇÃO

A simulação de fachadas com grelhas de ventilação com diferentes áreas de abertura tem como objetivos principais:

- Avaliação da influência da área de abertura das grelhas na performance térmica de uma fachada;
- Quantificação dos caudais de ventilação para diferentes áreas de grelha.

Os modelos de fachada de dupla pele descritos até agora utilizam grelhas de 15 centímetros de largura para a ventilação da cavidade e estão dispostas ao longo de todo o comprimento do envidraçado em que estão inseridas. Deste modo, cada grelha modelada no DesignBuilder tem  $20 \text{ m} \times 0,15 \text{ m} = 3,0 \text{ m}^2$  de área, o que corresponde a 5 % da área total do envidraçado.

De forma a aferir as consequências da alteração da área das aberturas na fachada, serão simuladas FDP do tipo Cortina de Ar Exterior e Cortina de Ar Interior com as dimensões de grelhas apresentadas no quadro seguinte:

Quadro 4.1 – Diferentes áreas de grelha simuladas

Área de grelha / Área de fachada (%)	Dimensões (m x m)	Área de grelha (m <sup>2</sup> )
2,5	0,075 x 20	1,5
5,0	0,15 x 20	3,0
10	0,30 x 20	6,0
20	0,60 x 20	12,0

No DesignBuilder é necessário modelar de novo os panos da FDP em que se encontram as grelhas de ventilação. No caso das fachadas Cortina de Ar Exterior, o resultado será o apresentado na Fig. 4.5.

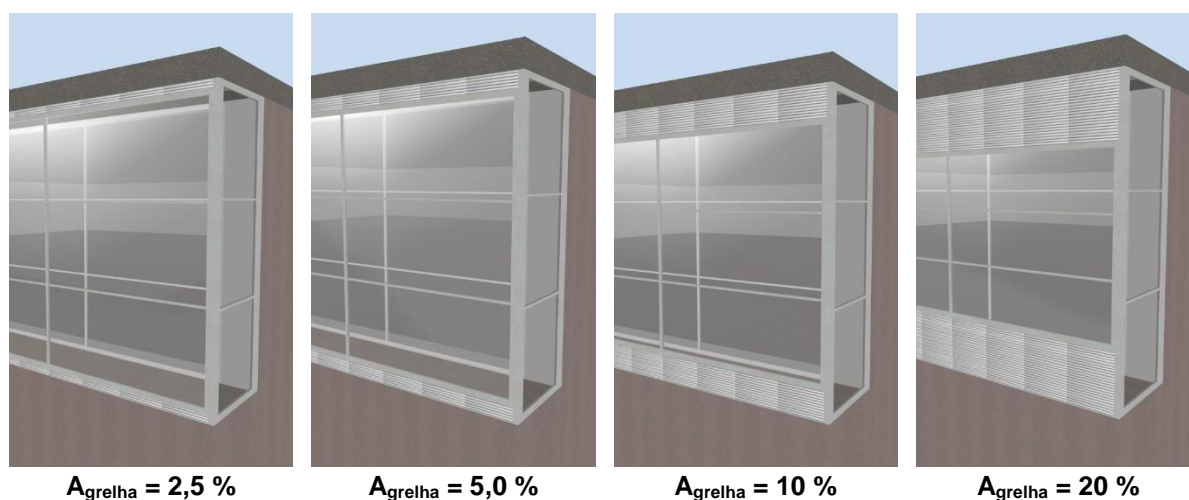


Fig. 4.5 – Diferentes áreas de grelhas de ventilação simuladas no DesignBuilder

As modificações feitas ao nível das áreas das grelhas de ventilação irão provocar alterações ao nível do caudal que atravessa a fachada ( $Q_{\text{chaminé}}$ ;  $Q_{\text{vento}}$ ) e do coeficiente de transmissão térmica por convecção dentro da cavidade ( $h_{\text{cv}}$ ), o que se traduzirá numa alteração da temperatura do ar no seu interior e, consequentemente, nas trocas de calor com a zona ocupada.

#### 4.3.5 TIPO DE VIDRO

A simulação de fachadas com diferentes tipos de vidro tem como objetivo principal:

- Avaliação da influência das características dos vãos envidraçados na performance térmica de uma fachada.

De modo a aferir o comportamento de uma FDP em função do tipo de vidro do pano exterior e interior, estudar-se-á uma fachada com a geometria Corredor do tipo Tampão (Tp), Cortina de Ar Exterior (CAE) e Cortina de Ar Interior (CAI). Opta-se por fazer combinações com sete tipos de vidro diferentes, incluindo o que havia já sido utilizado nas restantes simulações (denominado “Caso Base (10mm)”). Escolhe-se um conjunto de vidros com diferentes propriedades, como vidros simples e duplos, incolores e coloridos e também de baixa emissividade. As características dos tipos de vidro em análise encontram-se destacados no Quadro 4.2. Os dados de vidros utilizados pelo DesignBuilder são fornecidos pela International Glazing Database (IGDB), que consiste numa base de dados pública de mais de três mil tipos de envidraçados de vários fornecedores mundiais, comercializados atualmente.

Quadro 4.2 – Propriedades dos diferentes tipos de vidro usados na análise de sensibilidade

Tipo de vidro	Espessura (mm)	Coefficiente de transmissão térmica ( $W/m^2 \cdot ^\circ C$ )	Fator solar (-)	Transmissão luminosa (-)	Designação no DesignBuilder
Simplex Incolor	10	5,667	0,794	0,860	Caso Base (10mm)
Simplex Incolor	3	5,894	0,861	0,898	SglClr 3mm
Simplex Verde	3	5,894	0,722	0,821	Sgl Green 3mm
Simplex Baixa Emissividade	3	3,835	0,768	0,741	Sgl LoE (e2=.2) Clr 3mm
Duplo Incolor	3+6+3	3,159	0,762	0,812	DblClr 3mm/6mm Air
Duplo Verde	3+6+3	3,159	0,621	0,743	DblGreen 3mm/6mm Air
Duplo Baixa Emissividade	3+6+3	2,597	0,691	0,744	Dbl LoE (e2=.2) Clr 3mm/6mm Air

Apesar de o DesignBuilder utilizar o valor da condutância (k) dos vidros nos seus cálculos internos (como foi demonstrado no Capítulo 2), este não apresenta de forma direta o seu valor, daí a ausência deste parâmetro no quadro anterior. No entanto o programa apresenta o valor do coeficiente de transmissão térmica (U) dos diferentes tipos de envidraçado. O parâmetro U é calculado internamente pelo DesignBuilder para um determinado conjunto de condições ambientais e o seu valor é apresentado no Quadro 4.2.

De modo a facilitar a simulação das diferentes combinações de envidraçado, será utilizado o modo de estudos paramétricos do DesignBuilder. Este módulo de simulação apenas permite retirar como dado de saída o gráfico referente aos consumos totais de energia do edifício, que inclui não só as necessidades de climatização do espaço interior, como também os gastos energéticos relacionados com a utilização de equipamento de escritório e com a iluminação artificial. A estratégia de iluminação artificial utilizada nas restantes simulações corresponde a um modelo adaptativo, que depende das condições de iluminação natural. A simulação de fachadas com vidros de diferentes características faz variar os níveis de iluminação da zona interior. Por exemplo, uma fachada com um vidro com uma menor transmissão luminosa provoca um aumento do consumo de energia relacionado com a iluminação artificial. Isto conduz a consumos de energia para iluminação diferentes, que se refletem no gráfico de saída dos consumos totais de energia.

Como o principal objetivo desta simulação é avaliar a performance térmica dos vidros escolhidos para a FDP (e não a influência da transmissão luminosa) adotou-se para esta simulação um regime de iluminação artificial constante ao longo de todo o horário de ocupação do edifício. Assim, é possível



analisar a influência das características de isolamento térmico do vidro e o seu efeito nos ganhos solares da fachada, sem interferência de outras variáveis externas.

A alteração das características do envidraçado da fachada de dupla pele terá influência no balanço térmico da fachada, como se pode verificar pela observação das equações 3.2. a 3.5. apresentadas no Capítulo 3. Irá ser alterada a emissividade dos vidros ( $\epsilon$ ) e a sua condutância ( $k$ ). Para além disso, a quantidade de radiação solar transmitida ao interior do edifício também será afetada com a alteração do fator solar ( $g_{\perp}$ ) dos vãos envidraçados interior e exterior.

#### 4.4. INFLUÊNCIA DO AMBIENTE INTERIOR E EXTERIOR

A análise de sensibilidade a realizar em relação ao ambiente interior e exterior nesta dissertação terá como objetivo a melhor compreensão da influência da variação das condições ambientais no comportamento de uma fachada de dupla pele, fazendo-se alterar os ganhos internos, a orientação, o clima e o número de fachadas envidraçadas do edifício modelado.

Tendo já sido simulados diferentes tipos de FDP, não haverá grande interesse em aplicar esta análise de sensibilidade a todos esses modelos. Como tal, selecionou-se a geometria Corredor e as tipologias Tampão (Tp), Cortina de Ar Exterior (CAE) e Cortina de Ar Interior (CAI) para levar a cabo este estudo.

##### 4.4.1 GANHOS INTERNOS

A simulação de um edifício com diferentes níveis de ganhos internos tem como objetivo principal:

- Avaliação da influência dos ganhos internos na performance térmica de edifícios com e sem FDP.

Os casos descritos em 4.3 dizem respeito a edifícios em que os ganhos internos têm uma grande influência no balanço térmico do mesmo. Como tal, de modo a analisar o comportamento de fachadas de dupla pele em edifícios com diferentes níveis de ganhos internos voltaram-se a simular os casos de fachadas Corredor do tipo CAE e CAI com 50 % e 0 % dos ganhos internos considerados inicialmente. Como ponto de comparação, também se simulou o caso base de uma fachada de vidro simples tradicional com níveis inferiores de iluminação artificial, de utilização de equipamento e de ocupação. O número de renovações horárias de ar relacionado com a ventilação mecânica do espaço interior foi mantido igual em todos os casos analisados. O Quadro 4.3 sintetiza os níveis de ganhos internos considerados em cada simulação.

Quadro 4.3 – Resumo dos ganhos internos considerados em cada cenário de simulação

Percentagem de Ganhos Internos	Iluminação Artificial Máxima ( $W/m^2$ )	Equipamento de Escritório ( $W/m^2$ )	Ocupação (pessoas/ $m^2$ )	Rph da Zona Ocupada ( $h^{-1}$ )
100 %	12	10	0,10	1,20
50 %	6	5	0,05	1,20
0 %	0	0	0,00	1,20

As alterações feitas ao nível dos ganhos internos terão influência no balanço energético do espaço interior, afetando o parâmetro que diz respeito à soma dos ganhos internos por convecção ( $\dot{Q}_i$ ) e, consequentemente, a troca de calor entre o ar interior da zona e o sistema de climatização ( $\dot{Q}_{\text{sist}}$ ).

#### 4.4.2 ORIENTAÇÃO DA FACHADA

A simulação de fachadas com diferentes orientações tem como objetivos principais:

- Avaliação da influência da orientação da fachada na sua performance térmica;
- Análise da diferença entre os valores dos ganhos solares para diferentes orientações;
- Quantificação das perdas de calor através do envidraçado para cada orientação.

As simulações realizadas anteriormente foram todas feitas para fachadas orientadas a Sul, na tentativa de mostrar a situação mais gravosa no que diz respeito aos ganhos solares e às necessidades de arrefecimento do edifício. De modo a perceber como é que variam estes parâmetros em função da orientação da fachada envidraçada, serão agora feitas simulações para as orientações Norte, Este e Oeste, de um mesmo caso de estudo localizado no Porto.

No DesignBuilder, a alteração da orientação de um edifício é feita de forma muito simples na aba “Location” através da seleção do ângulo que uma linha perpendicular ao plano da fachada principal faz com o Norte. Deste modo, a orientação Norte corresponde a um ângulo de 0°, Este a 90°, Sul a 180° e Oeste a 270°.

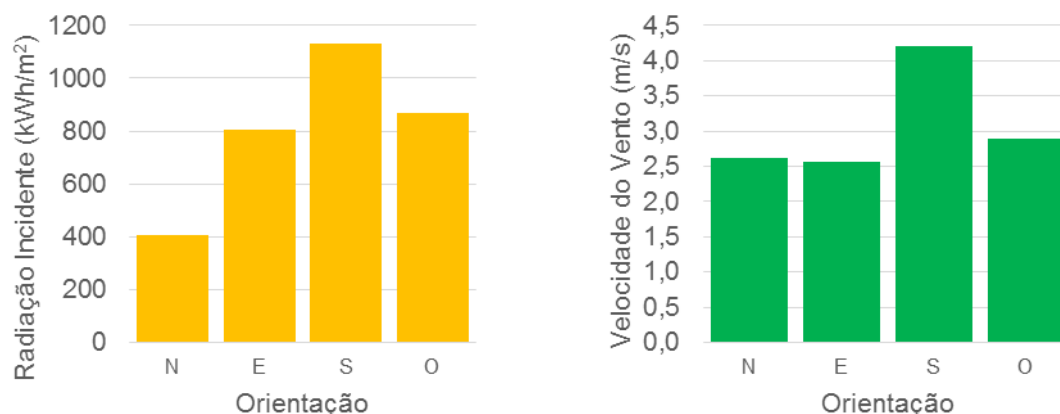


Fig. 4.6 – Radiação solar incidente por metro quadrado (à esquerda) e velocidade média do vento (à direita) para os quatro pontos cardeais principais na cidade do Porto

A mudança da orientação da fachada principal fará alterar valores relacionados com a radiação solar incidente ( $I_{\text{directa}}$ ,  $I_{\text{difusa}}$  e  $I_{\text{refletida}}$ ) – ver Fig. 4.6. Para além disso, existem outros fatores que são afetados, como a velocidade do vento ( $v$ ) e os respetivos coeficientes de pressão ( $C_v$ ), que fazem alterar as condições de ventilação da cavidade da FDP. Isto terá consequências ao nível do balanço energético do edifício, especificamente no que diz respeito aos ganhos solares e à transferência de calor através do envidraçado.

#### 4.4.3 CLIMA

A simulação de fachadas de edifícios localizados em zonas com diferentes climas tem como objetivos principais:

- Avaliação da influência do ambiente exterior na performance térmica de uma fachada;
- Análise da diferença entre os valores dos ganhos solares para diferentes climas;
- Quantificação das perdas de calor através do envidraçado para cada zona climática.

As fachadas de dupla pele não terão o mesmo interesse para o mesmo tipo de climas. Com isto em mente, serão feitas simulações para o mesmo tipo de fachada já apresentada, mas desta vez inseridas em climas europeus muito distintos do do Porto, com um inverno e verão mais extremos. As cidades escolhidas foram Helsínquia (Finlândia) e Atenas (Grécia), cujo resumo das condições climáticas anuais é apresentado no Quadro 4.4.

Quadro 4.4 – Condições climáticas das três localizações em estudo

Helsínquia (Finlândia)	jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez
Temperatura média exterior (°C)	-3,9	-5,7	-1,0	3,7	9,9	14,0	16,7	15,8	10,2	5,9	-1,3	-3,0
Radiação solar normal média (kWh)	9,8	43,6	57,3	82,3	133,5	114,7	115,5	80,4	42,7	25,8	5,4	1,4
Velocidade média do vento (m/s)	4,1	3,6	4,6	3,1	3,6	3,6	4,0	3,4	3,2	4,1	3,9	4,7
Porto (Portugal)	jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez
Temperatura média exterior (°C)	9,4	10,7	11,6	13,2	14,5	17,8	19,0	19,4	18,0	15,5	12,2	10,3
Radiação solar normal média (kWh)	58,3	78,6	129,4	148,0	169,2	188,4	188,9	175,6	132,0	107,1	48,3	59,6
Velocidade média do vento (m/s)	2,8	4,0	3,9	3,3	4,1	1,6	3,2	2,2	1,9	3,7	3,1	1,9
Atenas (Grécia)	jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez
Temperatura média exterior (°C)	10,7	9,6	11,4	15,1	19,6	24,6	27,3	27,6	23,9	19,1	14,5	10,9
Radiação solar normal média (kWh)	75,9	70,7	104,0	121,4	149,3	197,9	220,4	191,3	165,1	101,5	59,0	63,2
Velocidade média do vento (m/s)	3,3	3,8	3,6	2,7	2,9	3,7	3,2	3,0	3,1	3,2	3,1	2,6

O DesignBuilder possibilita a alteração da localização do edifício e do tipo de clima a este associado a partir da aba “Location”. A seleção do local é feita a partir de uma lista de cidades de mais de cem países, às quais estão associados dados climatéricos horários anuais.

A modificação do clima do local onde está instalado o edifício faz alterar parâmetros relativos ao cálculo do seu balanço térmico, como a temperatura exterior ( $T_{ext}$ ), radiação solar ( $I_{direta}$ ,  $I_{difusa}$  e  $I_{refletida}$ ) e variáveis associadas à ação do vento sobre a fachada ( $v$ ,  $C_v$ ).

#### 4.4.4 NÚMERO DE FACHADAS ENVIDRAÇADAS

A simulação de fachadas com mais do que uma fachada envidraçada tem como objetivos principais:

- Avaliação da influência do número de fachadas envidraçadas na performance térmica de um edifício;
- Análise da diferença entre os valores dos ganhos solares para diferentes áreas de envidraçado;
- Quantificação das perdas de calor através do envidraçado para edifícios com a envolvente totalmente envidraçada.

Todas as simulações feitas anteriormente foram realizadas para modelos de edifícios com apenas uma fachada envidraçada. Apesar de esse método permitir retirar diversas conclusões acerca do comportamento das FDP, torna-se também interessante analisar o comportamento de um edifício em que toda a envolvente exterior é envidraçada. Para tal, selecionou-se uma fachada Multi-Piso e simularam-se três esquemas diferentes de ventilação: Tampão (Tp), Cortina de Ar Exterior (CAE) e Cortina de Ar Interior (CAI). Para além disso, modelou-se também um edifício em que as quatro fachadas interiores são constituídas por um vão envidraçado simples de modo a comparar o seu balanço energético anual com o do caso base – ver Fig. 4.7.

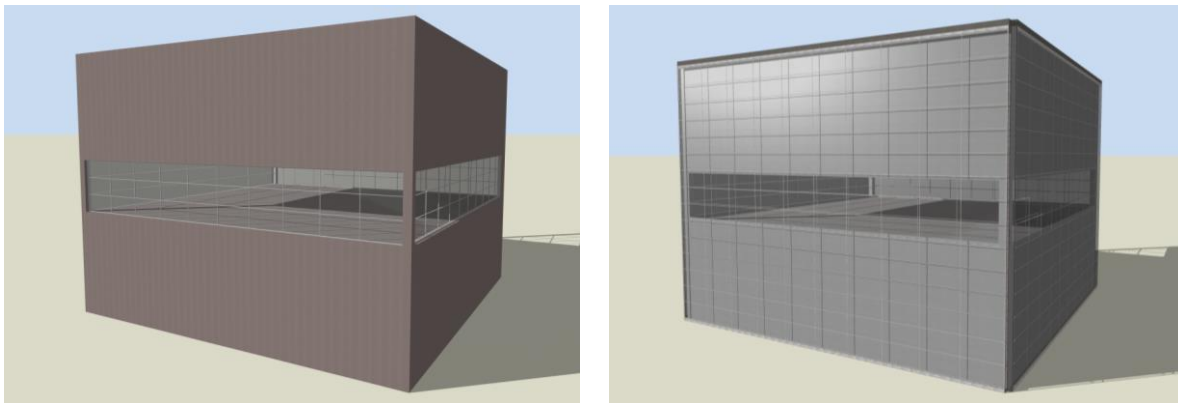


Fig. 4.7 – Edifício com quatro fachadas envidraçadas simples (à esquerda) e modelo com quatro fachadas de dupla pele (à direita)

A alteração do número de fachadas envidraçadas irá ter influência em algumas variáveis que entram no cálculo do balanço térmico do edifício. Haverá variações ao nível da radiação solar ( $I_{direta}$ ,  $I_{difusa}$  e  $I_{refletida}$ ) e de aspetos relacionados com a ventilação da cavidade ( $v$ ,  $C_v$ ).

#### 4.5. SÍNTESE DO CAPÍTULO

De modo a resumir a informação apresentada ao longo de todo este capítulo e a sintetizar os dados de entrada e de saída de cada grupo de simulações, agregou-se toda esta informação no Quadro 4.5. As diversas simulações realizadas foram numeradas sequencialmente. A lista e descrição completa de todas as simulações realizadas encontra-se em anexo, no final da presente dissertação. Os “Parâmetros de entrada” são as variáveis alteradas pelo utilizador antes da simulação e os “Parâmetros afetados” dizem respeito aos valores calculados pelo DesignBuilder que são influenciados pelas alterações feitas ao modelo e que têm especial interesse para o cenário que se pretende estudar.

Quadro 4.5 – Síntese dos diferentes cenários simulados

Aspeto em análise	Ref. das simulações	Parâmetros de entrada	Parâmetros afetados	Componentes do balanço estudadas
Geometria	00 – 20	–	$\dot{Q}_{sist}$ (3.1.) $R_{solar}$ (3.7.)	Energia de climatização Ganhos solares Transferência de calor através do envidraçado
Percurso do fluxo de ar	01 – 20	$H'$ (3.9.) $C_d$ (3.9.)	$\dot{Q}_{sist}$ (3.1.) $h_{cv}$ (3.3.) (3.4.) $Q_{vento}$ (3.9.) $Q_{chaminé}$ (3.10.)	Energia de climatização Transferência de calor através do envidraçado Temperatura do ar na cavidade
Espessura da cavidade	06 – 09 21 – 30	$s$ (3.6.)	$\dot{Q}_{sist}$ (3.1.) $h_{cv}$ (3.3.) (3.4.) $Q_{vento}$ (3.9.) $Q_{chaminé}$ (3.10.)	Energia de climatização Temperatura do ar na cavidade Caudal de ventilação da cavidade
Área das grelhas de ventilação	07 – 08 31 – 36	$H'$ (3.9.) $A_{abertura}$ (3.8.) (3.9.)	$\dot{Q}_{sist}$ (3.1.) $h_{cv}$ (3.3.) (3.4.) $Q_{vento}$ (3.9.) $Q_{chaminé}$ (3.10.)	Energia de climatização Caudal de ventilação da cavidade
Tipo de vidro	06b 07b 08b	$\epsilon$ (3.2.) – (3.5.) $k$ (3.2.) – (3.5.) $g_{\perp}$ (3.7.)	$\dot{Q}_{sist}$ (3.1.) $R_{solar}$ (3.7.)	Consumo total de energia (climatização + equipamento + iluminação)
Ganhos internos	00 06 – 08 37 – 44	$\dot{Q}_i$ (3.1.)	$\dot{Q}_{sist}$ (3.1.)	Energia de climatização
Orientação da fachada	00 06 – 08 45 – 56	$I_{direta}$ (3.7.) $I_{difusa}$ (3.7.) $I_{refletida}$ (3.7.) $v$ (3.9.)	$\dot{Q}_{sist}$ (3.1.) $R_{solar}$ (3.7.) $C_v$ (3.9.)	Energia de climatização Ganhos solares Transferência de calor através do envidraçado
Clima	00 06 – 08 57 – 64	$T_{ext}$ (3.2.) $I_{direta}$ (3.7.) $I_{difusa}$ (3.7.) $I_{refletida}$ (3.7.) $v$ (3.9.)	$\dot{Q}_{sist}$ (3.1.) $R_{solar}$ (3.7.) $C_v$ (3.9.)	Energia de climatização Ganhos solares Transferência de calor através do envidraçado
Nº de fachadas envidraçadas	65 – 68	$I_{direta}$ (3.7.) $I_{difusa}$ (3.7.) $I_{refletida}$ (3.7.) $v$ (3.9.)	$\dot{Q}_{sist}$ (3.1.) $R_{solar}$ (3.7.) $C_v$ (3.9.)	Energia de climatização Ganhos solares Transferência de calor através do envidraçado



# 5

## APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

### 5.1. ENQUADRAMENTO

No presente capítulo serão apresentados os resultados das simulações descritas nas páginas anteriores. Proceder-se-á também à análise e discussão dos dados extraídos do DesignBuilder, procurando tirar conclusões que ajudem a perceber melhor o funcionamento das fachadas de dupla pele em vários cenários distintos. Sempre que possível, os resultados serão expressos na forma de gráficos, de modo a possibilitar uma interpretação mais simples e rápida por parte do leitor. No fim de cada subcapítulo serão apresentadas as conclusões gerais relacionadas com o cenário de simulação correspondente. Os valores numéricos dos dados de saída do programa referentes às simulações realizadas encontram-se em anexo, no final desta dissertação.

É importante referir que, nos gráficos correspondentes ao consumo anual de energia apresentados ao longo de todo este capítulo, os valores de aquecimento e arrefecimento incluem o efeito da ventilação mecânica na zona ocupada. Isto acontece pelo facto de a ventilação mecânica ser indissociável das necessidades de energia associadas ao sistema de climatização no modo de simulação seleccionado no DesignBuilder, como foi anteriormente exposto no Capítulo 3. Por uma questão de simplicidade, nos comentários subsequentes a cada gráfico, os seus valores serão mencionados como “necessidades de aquecimento” e “necessidades de arrefecimento”.

### 5.2. MODELO BASE

O modelo base de simulação cujos resultados servirão como ponto de comparação diz respeito a um edifício com uma fachada de vidro tradicional, tal como descrito no Capítulo 4. As primeiras análises que serão feitas dizem respeito a este caso de estudo.

#### 5.2.1 VARIAÇÃO DA TEMPERATURA INTERIOR

A primeira análise que é interessante fazer diz respeito à variação da temperatura do ar no interior do edifício. Numa simulação do tipo *deadband* são definidos limites para a temperatura do ar na zona ocupada para o horário de funcionamento e para o período noturno (temperaturas de *setpoint* e de *setback*), que devem ser garantidos pelo sistema de climatização do edifício. A figura seguinte demonstra a variação anual da temperatura do ar na zona ocupada em contraste com os valores da temperatura exterior.

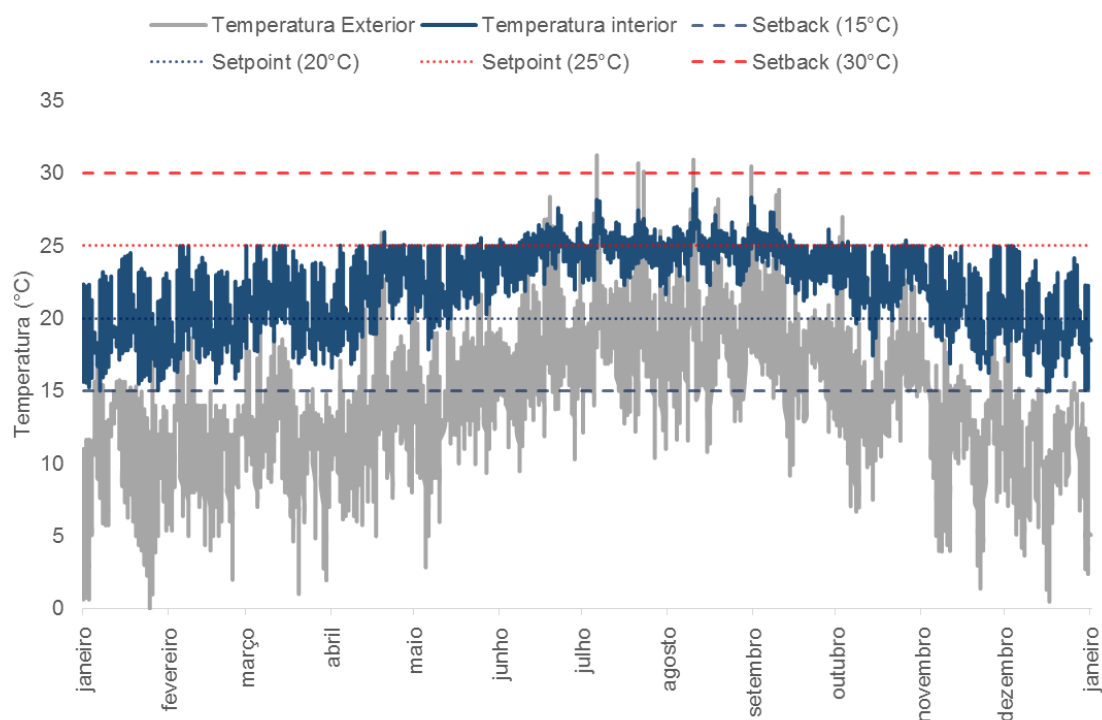


Fig. 5.1 – Variação das temperaturas exterior e interior ao longo de um ano típico

A Fig. 5.1 permite compreender melhor o conceito de temperatura de *setpoint* e de *setback*. Independentemente da temperatura exterior, o interior do edifício mantém-se sempre a uma temperatura entre os 20 °C e os 25 °C durante as horas de ocupação (07:00 – 19:00). Os pontos do gráfico em que a temperatura deixa de estar contida neste intervalo correspondem a períodos noturnos ou de fim de semana, em que não é necessário garantir o conforto dos ocupantes. Nestes casos, o sistema de climatização apenas é ativado quando a temperatura do ar interior se aproxima dos 15 °C ou dos 30 °C (temperaturas de *setback*).

É perceptível que esta se trata de uma situação teórica, pois o programa executa as simulações considerando que os equipamentos de climatização têm uma potência infinita. Na realidade, um edifício que possua um sistema de AVAC não se comportará exatamente desta forma, indo sempre existir picos de temperatura aos quais os equipamentos de aquecimento ou de arrefecimento não conseguirão dar uma resposta imediata.

### 5.2.2 BALANÇO ENERGÉTICO ANUAL

O balanço térmico de um espaço tem como variáveis as perdas pela envolvente, os ganhos internos, os ganhos solares e as parcelas correspondentes à ventilação e à energia fornecida pelo sistema de AVAC. Como já foi mencionado no Capítulo 3, o contributo da ventilação (natural e/ou mecânica) do espaço interior no balanço anual vem expressa juntamente com o da climatização (como aquecimento ou como arrefecimento, respetivamente no caso de o ar insuflado estar a uma temperatura superior ou inferior relativamente ao ar interior). Na Fig. 5.2 é possível observar a influência de cada uma destas parcelas no balanço anual de energia do modelo base simulado no DesignBuilder.



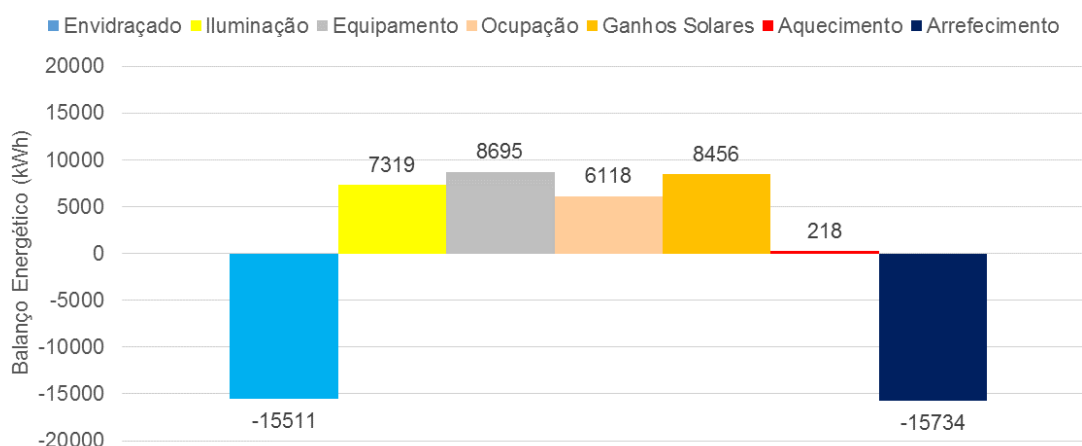


Fig. 5.2 – Balanço energético anual do modelo base

Através da leitura do gráfico de barras é possível tirar algumas conclusões acerca do comportamento térmico do edifício. A primeira é que as perdas de calor se verificam na sua totalidade através do envidraçado e pelo sistema de ventilação mecânica (cujo valor está incluído no do arrefecimento). Isto é compreensível uma vez que se considerou um piso intermédio de um edifício em banda e se fez com que todas as superfícies da envolvente exterior fossem adiabáticas, à exceção da fachada envidraçada.

Também é possível fazer uma análise comparativa de todos os ganhos de calor, chegando-se à conclusão que os mais preponderantes são a utilização de equipamento de escritório e os ganhos solares (que ainda assim são controlados com recurso a sistemas de sombreamento). Para além disso, os ganhos internos relacionados com a ocupação e com a iluminação artificial, cujos valores foram estabelecidos tendo em conta a bibliografia consultada (IES 2000; Jiang et al. 2009), têm uma grande influência no balanço térmico do modelo de edifício simulado. Esta grande quantidade de ganhos internos faz com que o sistema de climatização do edifício opere fundamentalmente para arrefecimento do espaço, sendo esta parcela a mais expressiva de todas as apresentadas.

A ventilação mecânica da zona interior foi definida em função da ocupação, como sendo igual a 10 l/s por pessoa (CIBSE 1999). Nos períodos de ocupação máxima, o número de renovações horárias de ar interior é de 1,20 h<sup>-1</sup>. Como foi anteriormente mencionado, a parcela das trocas de calor associada à ventilação mecânica é incluída nos dados de saída do DesignBuilder como aquecimento ou arrefecimento do ar da zona interior. Por exemplo, se a temperatura exterior for inferior à do ar interior do edifício, o ar insuflado para o interior devido à ventilação mecânica funcionará para arrefecer a zona ocupada e o seu efeito será incluído nos resultados da simulação como energia para arrefecimento. Neste caso específico em que não é considerada ventilação natural, torna-se possível a realização de uma simulação complementar de modo a diferenciar o contributo da climatização e da ventilação mecânica no balanço energético anual. Os resultados demonstram que 6 % (12,4 kWh) do aquecimento apresentado na Fig. 5.2 está relacionado com a ventilação mecânica do espaço interior, enquanto que, no que diz respeito ao arrefecimento, esse valor corresponde a 70 % (-11 018,1 kWh). Isto acontece porque o ar exterior (que é utilizado para ventilar mecanicamente a zona ocupada) se encontra a uma temperatura inferior comparativamente com o ar no interior do edifício durante a maior parte do ano, como é observável na Fig. 5.1.

De notar que a soma de todas as componentes do balanço anual não equivale a zero. Isto acontece devido a dois motivos:

- Apesar de se terem definido como adiabáticos todos os elementos da envolvente opaca, estes continuam a armazenar calor em função da sua inércia térmica. Ao definir um elemento construtivo como adiabático no DesignBuilder, apenas a face exterior desse mesmo elemento deixa de poder transmitir calor para o exterior. Isto faz com que o balanço energético no final possa ser diferente do inicial em função do calor que as paredes, pavimentos e tetos tenham armazenado num determinado momento;
- Os ganhos solares apresentados dizem respeito à energia transmitida através do envidraçado e não à energia que é de facto absorvida por toda a envolvente interior. Isto significa que a radiação solar que as paredes, pavimentos e tetos refletem de volta para o exterior não é apresentada na Fig. 5.2. Esta radiação refletida pela envolvente interior é calculada pelo DesignBuilder, mas o seu valor não é apresentado de forma direta como um dado de saída da simulação.

### 5.2.3 BALANÇO ENERGÉTICO DIÁRIO

Os ganhos internos são controlados através da definição de um horário de funcionamento ao longo do dia. Os ganhos provenientes da utilização de equipamentos eletrónicos são definidos com o mesmo horário de utilização que a ocupação do edifício – ver Quadro 3.3. Para a iluminação artificial é também estabelecido um horário de funcionamento (das 07:00 às 19:00), estando no entanto o seu funcionamento dependente da iluminação natural disponível no espaço. Esta apenas é ativada quando não é respeitado o critério dos 400 lux que foi estabelecido anteriormente. Assim sendo, a sua potência emitida está intrinsecamente relacionada com os níveis de iluminação provenientes do exterior e, consequentemente, com o valor dos ganhos solares.

Os ganhos solares são limitados através da ativação de dispositivos de sombreamento, que acontece para valores da radiação incidente iguais ou superiores a  $150 \text{ W/m}^2$ . A transferência de calor através dos envidraçados ocorre ao longo de todo o dia, podendo representar uma perda ou um ganho de calor em função da temperatura exterior.

De modo a ser mais fácil compreender a evolução de cada um destes parâmetros ao longo do dia, foi produzido um gráfico para um dia típico de verão (15 de julho) com o balanço térmico diário das trocas de calor através da fachada envidraçada, ganhos solares, iluminação artificial, uso de equipamento de escritório e ocupação – ver Fig. 5.3.

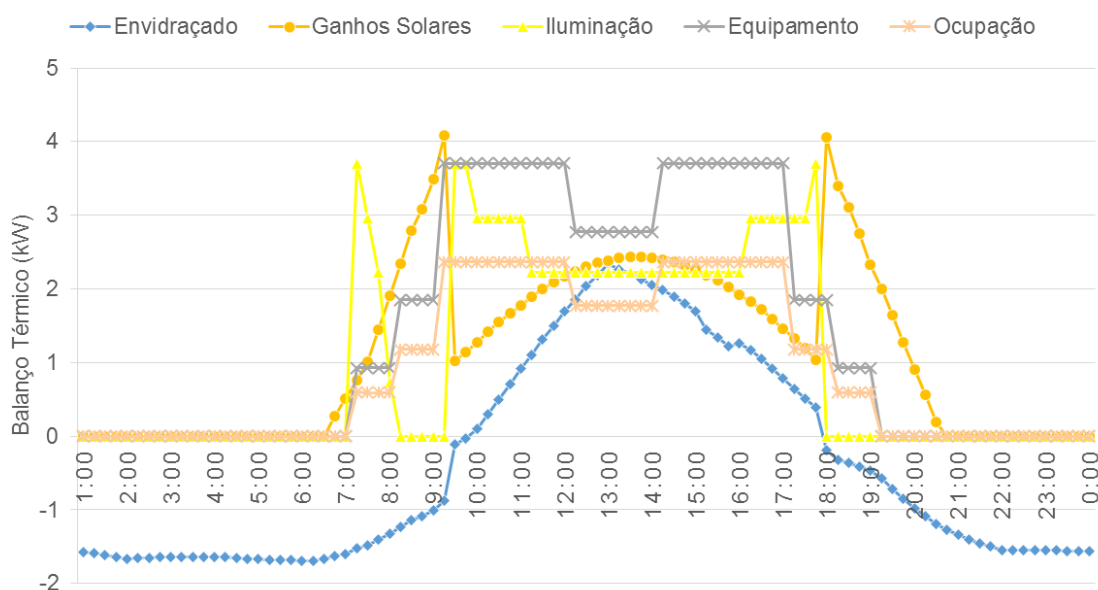


Fig. 5.3 – Ganhos internos e ganhos solares num dia típico de verão

A análise do gráfico correspondente a um dia de verão permite perceber melhor como funciona o DesignBuilder e os seus horários. Observa-se que o horário de utilização do edifício por parte dos utilizadores se inicia às 07:00 horas da manhã, sendo a ocupação sucessivamente crescente e atingindo o seu máximo imediatamente antes e a seguir ao período de almoço. Outra observação interessante é que o uso de equipamento, como foi definido com o mesmo horário que a ocupação, segue a mesma evolução ao longo do dia (com a agravante de representar um ganho de calor superior). Os níveis de iluminação artificial são máximos ao início da manhã e vão decrescendo à medida que aumentam os ganhos solares até ao ponto em que estes atingem o valor de  $150 \text{ W/m}^2$ . A partir deste momento são ativados os dispositivos de sombreamento que fazem diminuir bruscamente os ganhos solares, o que obriga a um novo aumento dos níveis de iluminação artificial. Ao final da tarde, esta situação repete-se de uma forma simétrica.

A ação da radiação solar começa-se a fazer sentir por volta das 06:30 e atinge o valor de  $150 \text{ W/m}^2$  por volta das 09:00. A partir desta hora verifica-se uma redução dos ganhos solares relacionada com a ativação do dispositivo de sombreamento. O estore encontra-se colocado na face exterior do vidro, a uma distância de 10 cm deste e as suas lâminas formam um ângulo de  $45^\circ$  com a horizontal. Por este mesmo motivo, observa-se que os ganhos solares continuam a aumentar, mesmo tendo os estores exteriores ativados.

Através da fachada de vidro, verifica-se um ganho de calor entre as 09:30 e as 18:00 e perdas de calor no período noturno, como seria de esperar por se atingirem temperaturas exteriores abaixo dos  $15^\circ \text{C}$  (temperatura de *setback* mínima). É também possível concluir que os períodos críticos de climatização deste dia são os momentos imediatamente antes e após a hora de almoço (antes das 12:00 e depois das 14:00 horas), em que as necessidades de climatização (arrefecimento) serão maiores, de modo a compensar os restantes ganhos de calor.

### 5.3. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DAS FDP

#### 5.3.1 GEOMETRIA E TIPO DE PERCURSO DO FLUXO DE AR

Neste capítulo optou-se por agrupar os resultados relativos às diferentes geometrias de fachada de dupla pele e aos diferentes tipos de percurso do fluxo de ar por estas duas características serem indissociáveis uma da outra. Os resultados do consumo energético para climatização do espaço interior correspondentes às diferentes tipologias de FDP vêm expressos no gráfico da Fig. 5.4. Os diferentes casos simulados foram organizados por tipo de percurso do fluxo de ar na cavidade e agrupados por tipo de geometria da fachada.

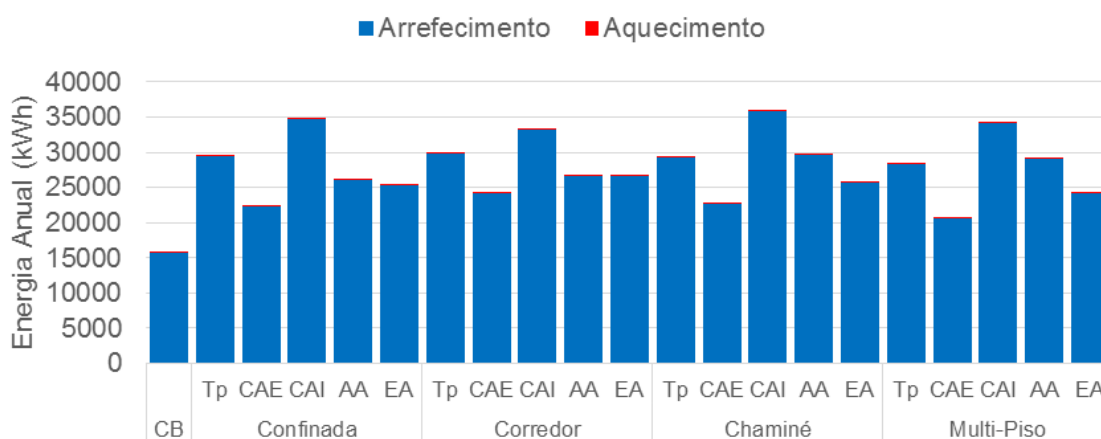


Fig. 5.4 – Energia anual associada ao sistema de AVAC de edifícios com diferentes tipologias de FDP

Nota: Os valores apresentados no gráfico anterior incluem o efeito da ventilação mecânica.

Uma breve análise ao gráfico permite retirar algumas conclusões:

- Todas as tipologias de fachadas de dupla pele exibem um maior consumo energético associado com o arrefecimento da zona ocupada do edifício comparativamente com o caso base (CB) de uma fachada envidraçada simples;
- As fachadas do tipo Confinada e Corredor apresentam, para a maior parte dos casos, uma maior necessidade de climatização relativamente às Chaminé e Multi-Piso;
- Os tipos de percurso de ar que conduzem a uma maior necessidade de climatização são o Tampão (Tp) e Cortina de Ar Interior (CAI);
- O tipo de percurso de ar que se traduz num menor consumo de energia é o Cortina de Ar Exterior (CAE);
- A melhor solução de FDP (Multi-Piso, CAE) ainda assim representa um aumento de 31 % das necessidades de climatização relativamente ao caso base. A pior solução de FDP (Chaminé, CAI) conduz a um aumento de 128 % relativamente ao caso base.

De modo a perceber melhor o que está por trás dos diferentes consumos associados a cada tipologia, são de seguida apresentados alguns gráficos que apresentam a temperatura média do ar na cavidade, os ganhos solares, as trocas de calor que ocorrem através do envidraçado e os caudais médios anuais de ventilação natural que se estabelecem na caixa de ar, para cada caso.

A Fig. 5.5 representa a evolução da temperatura na zona interior do edifício (Int) e na cavidade (Cav) de várias tipologias de fachada de dupla pele do tipo Corredor, durante um dia de inverno (25 de janeiro).

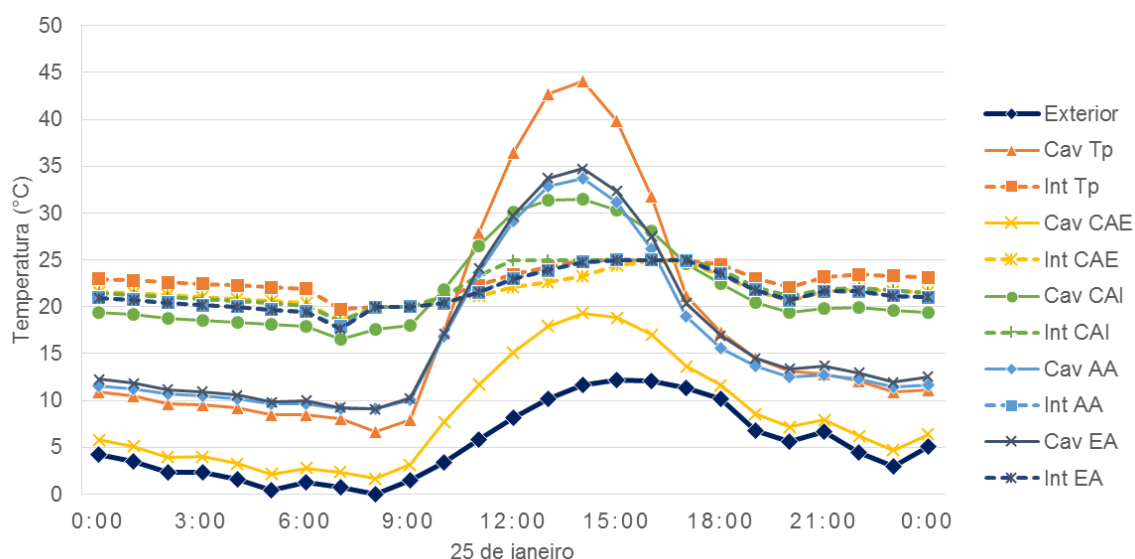


Fig. 5.5 – Variação da temperatura média na caixa de ar de diferentes tipos de FDP durante um dia de inverno

A partir da sua análise é possível concluir que:

- Existe uma grande dispersão entre as temperaturas máxima e mínima atingidas na cavidade, que é mais evidente na fachada Tampão ( $\Delta T \approx 37^\circ\text{C}$ );
- A fachada que atinge temperaturas mais elevadas é a do tipo Tampão (Tp) durante as horas de radiação solar incidente, enquanto que a fachada Cortina de Ar Exterior (CAE) tem uma temperatura na caixa de ar inferior às restantes tipologias ao longo de todo o dia;
- Durante o período noturno verifica-se que a temperatura na cavidade é máxima para a fachada do tipo Cortina de Ar Interior (CAI), por ser aquela em que se regista uma maior troca de ar com a zona interior. No entanto, é também para esta tipologia que se verifica um arrefecimento da temperatura na zona interior mais eficiente durante as horas de desocupação.

A Fig. 5.6 representa a evolução da temperatura na zona interior do edifício (Int) e na cavidade (Cav) de várias tipologias de fachada de dupla pele do tipo Corredor durante um dia de verão (9 de agosto).

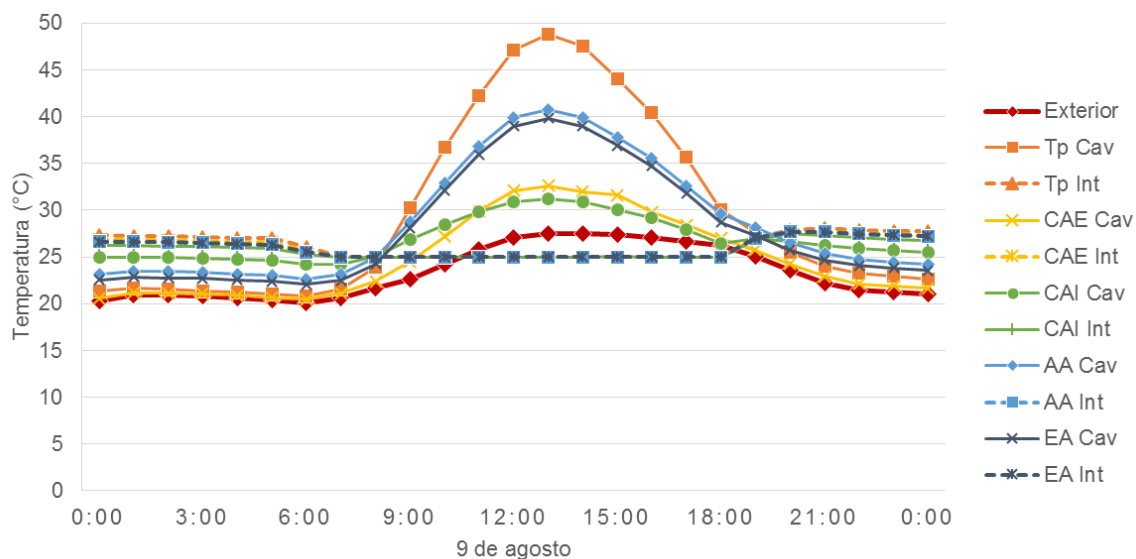


Fig. 5.6 – Variação da temperatura média na caixa de ar de diferentes tipos de FDP durante um dia de verão

A partir da sua leitura é possível concluir que:

- A diferença máxima entre a temperatura máxima e mínima atingidas na caixa de ar verifica-se para a fachada do tipo Tampão ( $\Delta T \approx 27^\circ\text{C}$ );
- À semelhança do que se registou na simulação do dia de inverno, a fachada que atinge temperaturas mais elevadas é a do tipo Tampão (Tp) durante as horas de radiação solar incidente, enquanto que a fachada Cortina de Ar Exterior (CAE) tem uma temperatura na caixa de ar inferior às restantes tipologias ao longo de todo o dia;
- Durante o período noturno não existe uma grande possibilidade de arrefecimento da cavidade e da zona interior, pelo facto de a temperatura do ar exterior nunca descer abaixo dos  $20^\circ\text{C}$ .

Em seguida foram analisados os ganhos solares para cada tipologia de fachada de dupla pele simulada. Os resultados vêm expressos na figura seguinte:

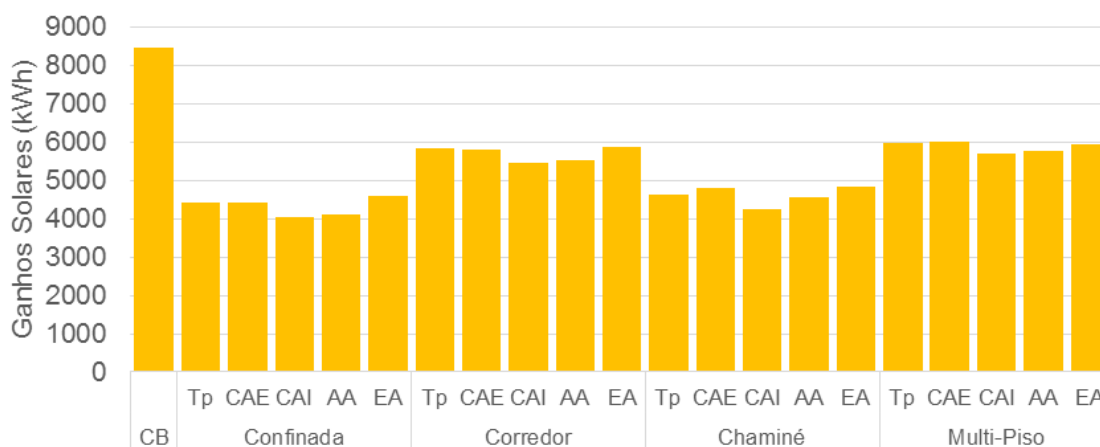


Fig. 5.7 – Ganhos solares anuais de edifícios com diferentes tipologias de FDP

Da leitura do gráfico da Fig. 5.7 conclui-se o seguinte:

- Os valores dos ganhos solares são relativamente uniformes ao longo das várias simulações. Isto valida, em certa medida, a forma como foram modeladas as diferentes fachadas e viabiliza a comparação dos resultados obtidos para as diferentes geometrias;
- O caso base (com um único vão envidraçado) apresenta um valor de ganhos solares 70 % superior à média das simulações feitas com fachadas de dupla pele;
- As geometrias Corredor e Multi-Piso apresentam valores de ganhos solares relativamente superiores (cerca de +30 %) em comparação com as fachadas Confinada e Chaminé. Isto acontece pois estas duas últimas possuem um maior número de divisórias envidraçadas na sua constituição, o que faz com que haja uma maior parcela da radiação solar a ser refletida de volta para o exterior.

De modo a avaliar a capacidade da fachada de dissipar os ganhos internos, registaram-se as perdas de calor através do envidraçado interior. Os resultados podem ser observados no gráfico seguinte:

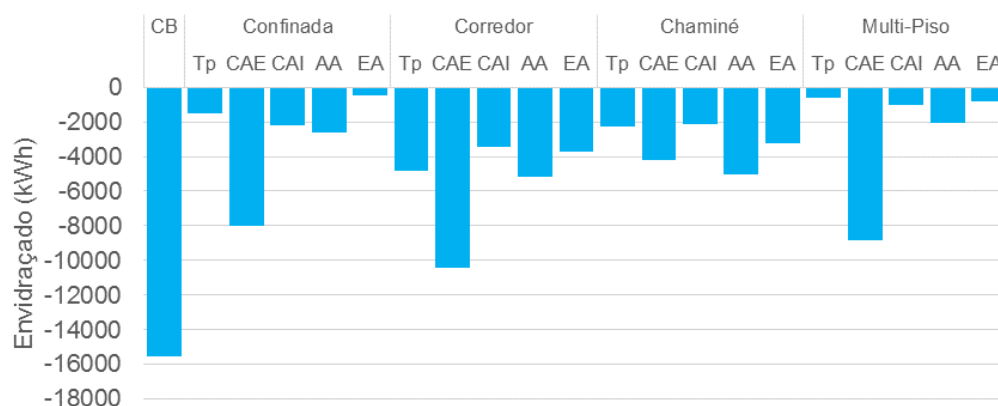


Fig. 5.8 – Transferência de calor através do envidraçado de edifícios com diferentes tipologias de FDP

A Fig. 5.8 apresenta as perdas de calor anuais que se verificam através do envidraçado interior. A partir da leitura do gráfico é possível concluir que:

- No caso base (CB) de uma fachada envidraçada tradicional observa-se uma transferência de calor para o exterior 3,3 vezes superior à média dos casos simulados com fachada de dupla pele;
- As perdas de calor através do envidraçado dos diferentes tipos de percurso do fluxo de ar são semelhantes dentro de cada geometria de fachada simulada;
- A tipologia Cortina de Ar Exterior (CAE) apresenta uma maior perda de calor através do envidraçado interior;
- Nas fachadas do tipo Tampão (Tp) verifica-se uma menor transferência de calor anual para o exterior em todas as geometrias de FDP.

É também interessante fazer uma análise às condições de ventilação das diferentes fachadas. Para tal, extraiu-se do DesignBuilder o caudal de ventilação médio anual associado às grelhas de ventilação instaladas na fachada. Os resultados desta análise são representados na imagem seguinte:

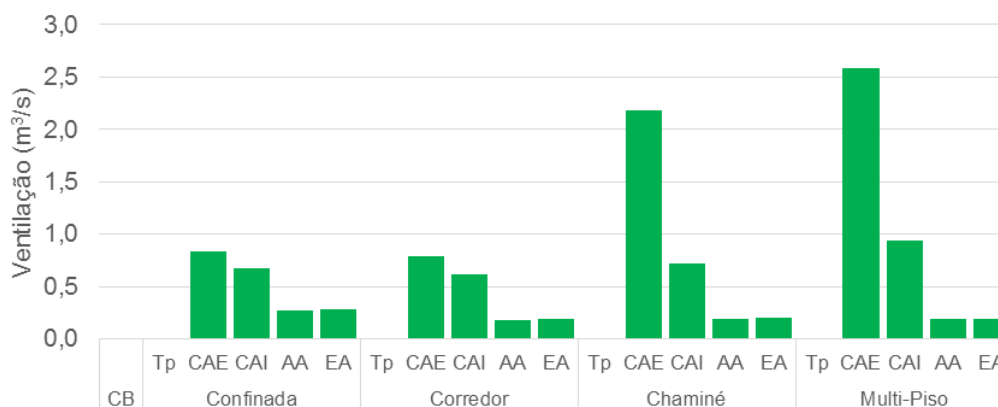


Fig. 5.9 – Caudal médio de ventilação da cavidade para diferentes tipologias de FDP



Passando agora para a análise das condições de ventilação da cavidade, a Fig. 5.9 demonstra que:

- As fachadas com o percurso de ar do tipo Cortina de Ar Exterior (CAE) admitem um caudal de ventilação superior ao de todas as outras tipologias. Esta diferença é mais visível no caso de fachadas do tipo Chaminé e Multi-Piso, em que a cavidade se prolonga ao longo de múltiplos pisos;
- Nas tipologias Admissão de Ar (AA) e Exaustão de Ar (EA), os caudais de ventilação são mais reduzidos em todas as geometrias analisadas, não sofrendo uma grande variação quando se altera a geometria da fachada.

O DesignBuilder permite executar simulações desprezando o contributo da ação do vento para a ventilação natural. Através da comparação dos resultados das simulações com e sem a ação do vento, para a tipologia Cortina de Ar Exterior (CAE), verificou-se que, em média, o efeito chaminé é responsável por cerca de 35 % do caudal ventilado nas fachadas do tipo Confinada e Corredor e por 55 % nas do tipo Chaminé e Multi-Piso – ver Fig. 5.10.

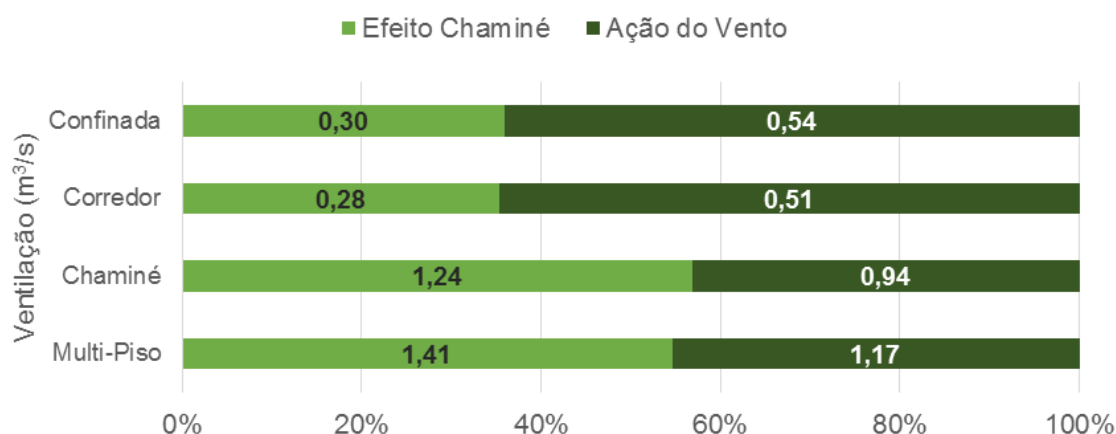


Fig. 5.10 – Relação entre a parcela de ventilação causada por efeito chaminé e por ação do vento em fachadas do tipo Cortina de Ar Exterior (CAE)

O módulo de análise de Dinâmica de Fluidos Computacional (CFD) do DesignBuilder foi utilizado para confirmar o modo de funcionamento das diferentes tipologias de fachada de dupla pele. Os resultados desta análise são apresentados através da introdução de planos de corte que seccionam o modelo 3D do edifício. Em cada corte, o programa exhibe a variação da temperatura do ar (através de um gradiente de cores) e a direção e velocidade de circulação do ar (representadas por vetores de dimensão variável).

As figuras seguintes apresentam análises CFD feitas para os diferentes tipos de geometria e diferentes percursos do fluxo de ar, às 14 horas do dia 15 de julho.

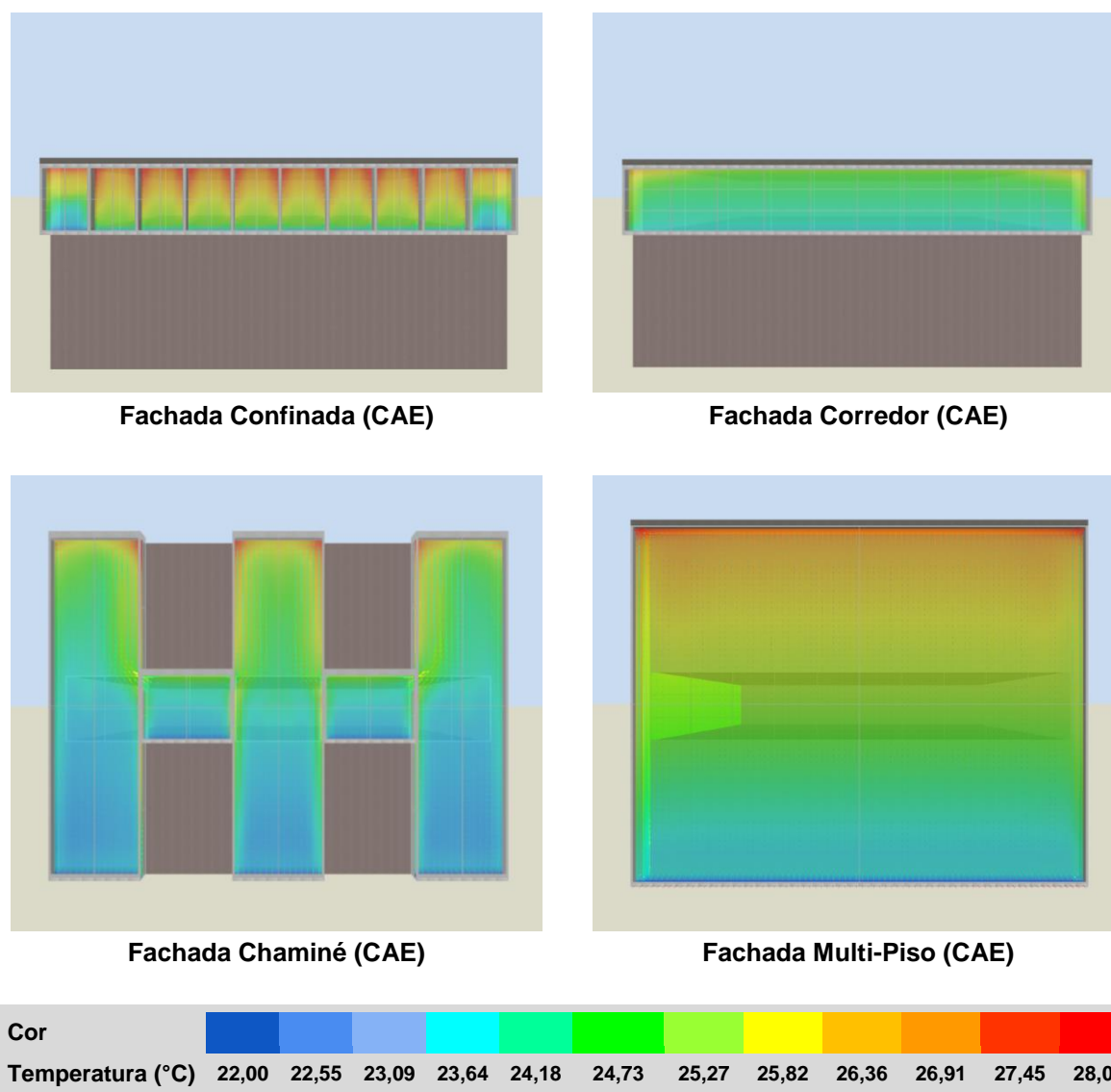


Fig. 5.11 – Resultados da análise CFD das quatro geometrias de fachada de dupla pele simuladas

Através da análise das simulações CFD das quatro geometrias de fachada (para o tipo de fluxo de ar Cortina de Ar Exterior) é possível verificar que:

- Confirma-se a entrada do ar fresco pelas grelhas inferiores e a sua ascensão pela cavidade até ao todo da fachada, onde é extraído pelas grelhas de exaustão;
- A temperatura do ar vai subindo à medida que este percorre ascendentemente a caixa de ar;
- Na fachada Confinada é visível o aumento da temperatura do ar à medida que este atravessa o espaço de ar de cada bloco, atingindo-se temperaturas perto dos 28 °C junto ao topo. Os blocos laterais apresentam temperaturas mais baixas, pois a dissipação de calor para o exterior através do envidraçado é maior nas extremidades por estas possuírem mais faces em contacto direto com o exterior;
- Na fachada Corredor verifica-se um aumento gradual da temperatura do ar no interior da cavidade à medida que este sobe. As temperaturas máximas registam-se no topo da caixa de ar, não sendo atingidas temperaturas superiores a 26 °C no interior da cavidade;

- Na fachada Chaminé é possível observar a entrada de ar pelas grelhas localizadas na base das “colunas de ventilação” e das zonas de “caixa”. Verifica-se também que o ar que entra nas zonas de caixa atravessa os orifícios (localizados no topo da interface entre os diferentes blocos) continuando de seguida o seu percurso até ao topo da fachada através das colunas de ventilação;
- Na fachada Multi-Piso verifica-se o aumento gradual da temperatura no interior da cavidade com a altura. O gradiente da temperatura varia entre os 22 °C na base, até aos 28 °C no topo da fachada.

Em seguida foi feito o mesmo tipo de simulação para os diferentes tipos de percurso do fluxo de ar no interior da cavidade – ver Fig. 5.12. Escolheu-se como exemplo uma fachada do tipo Corredor para desenvolver as cinco análises. O gradiente de cores (cujas temperaturas limite podem ser alteradas no DesignBuilder) desta vez foi personalizado de forma individual para cada tipologia, de modo a ser possível visualizar o percurso de circulação do ar e a variação da sua temperatura em todas as situações. Os valores limite do gradiente de temperatura são indicados junto de cada figura.

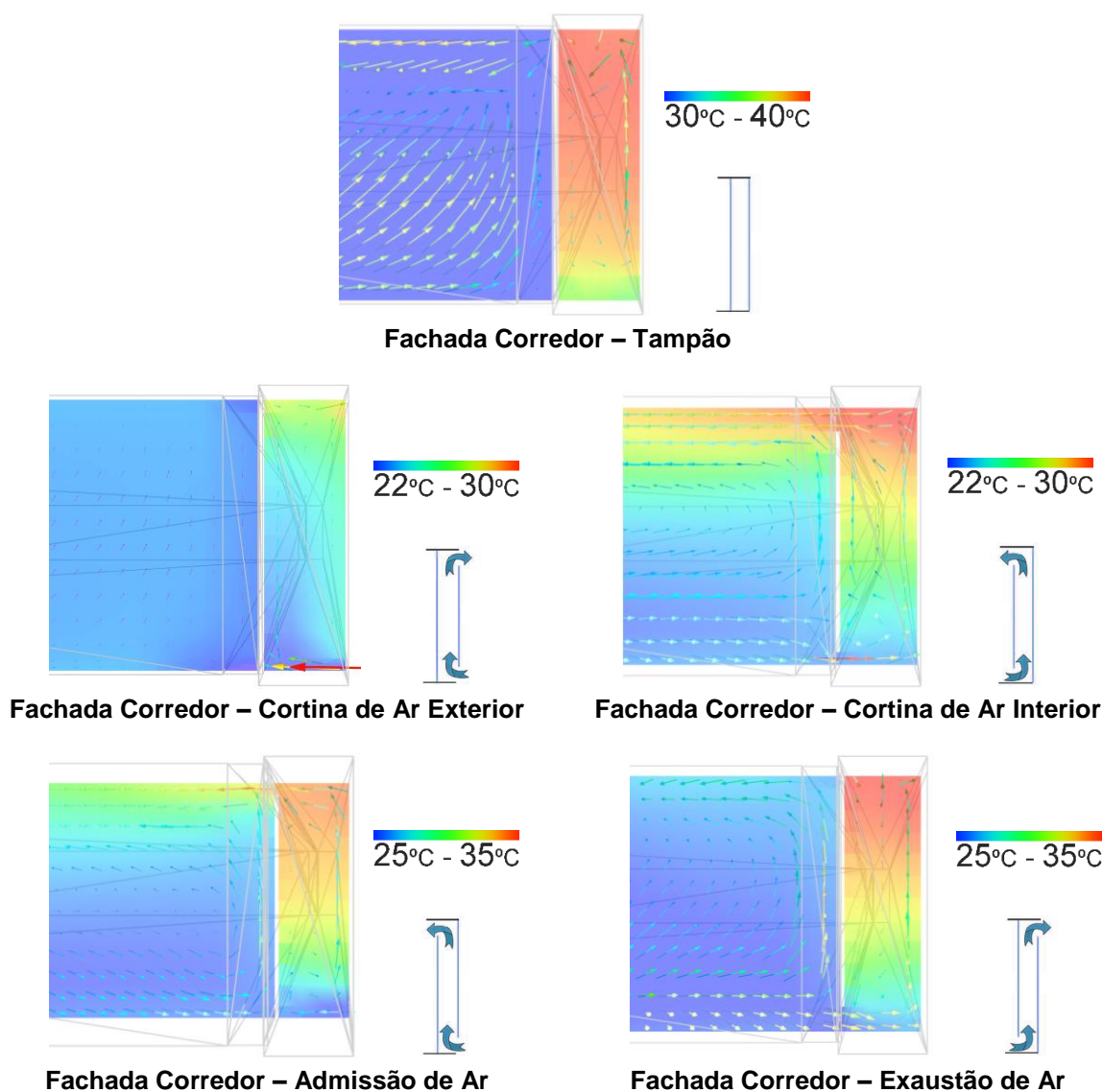


Fig. 5.12 – Resultados da análise CFD dos cinco tipos de percurso do fluxo de ar diferentes simulados

Através da análise das simulações CFD dos cinco tipos de percurso do fluxo de ar na cavidade (para uma fachada Corredor) podem-se tirar as seguintes conclusões:

- Todas as tipologias aparentam o percurso do fluxo de ar esperado, quer no caso de fachadas ventiladas com ar exterior, quer com ar interior;
- A fachada Tampão (Tp) é a que apresenta uma temperatura do ar na cavidade mais elevada;
- As fachadas Cortina de Ar Exterior (CAE) apresenta uma temperatura menor do ar na cavidade relativamente às restantes tipologias.

Após a análise de todos os resultados é possível tirar algumas conclusões gerais acerca da performance térmica das diferentes tipologias fachadas de dupla pele:

- Nesta análise foram variados a geometria da fachada e o tipo de percurso do fluxo de ar na cavidade. Verificou-se que o aspeto mais condicionante da eficiência da FDP é o percurso do fluxo de ar;
- O consumo de energia para climatização do espaço interior nos exemplos de FDP simulados é superior ao registado para o caso base de uma fachada de vidro tradicional. Isto acontece devido ao facto de as fachadas de dupla pele dificultarem a dissipação de calor da zona ocupada. Como se pode verificar pelas análises de CFD executadas, o ar na cavidade encontra-se a uma temperatura superior relativamente ao ar interior. Como não existem perdas de calor através do envidraçado nestas alturas, o sistema de climatização tem de consumir uma maior quantidade de energia para conseguir compensar os ganhos internos e manter a temperatura da zona ocupada abaixo do *setpoint* definido;
- Para o modelo de edifício simulado, a ventilação da cavidade tem uma grande influência na eficiência da fachada. As tipologias de fachada ventiladas com ar exterior ajudam a diminuir a temperatura do ar na cavidade e, consequentemente, contribuem para a dissipação de calor da zona ocupada. Por este motivo, as fachadas do tipo Cortina de Ar Exterior (CAE) são as que apresentam melhores resultados do ponto de vista da eficiência energética do edifício;
- A tipologia menos interessante do ponto de vista energético (para o caso simulado) é a Cortina de Ar Interior (CAI). Neste tipo de FDP o ar circula entre a zona ocupada e a cavidade, aquecendo e provocando um aumento das necessidades de arrefecimento da zona ocupada. Esta tipologia é mais interessante em países com um clima mais frio;
- As fachadas Tampão (Tp) não são ventiladas e, como tal, agravam o comportamento térmico do edifício (pelas razões apresentadas anteriormente), conduzindo a uma maior necessidade de arrefecimento do espaço interior.

### 5.3.2 ESPESSURA DA CAVIDADE

Para avaliar a influência da espessura da cavidade no comportamento de uma fachada de dupla pele foram simuladas fachadas do tipo Corredor com 25, 50 e 100 centímetros de espessura da caixa de ar. Os resultados do consumo energético para climatização vêm representados na Fig. 5.13.

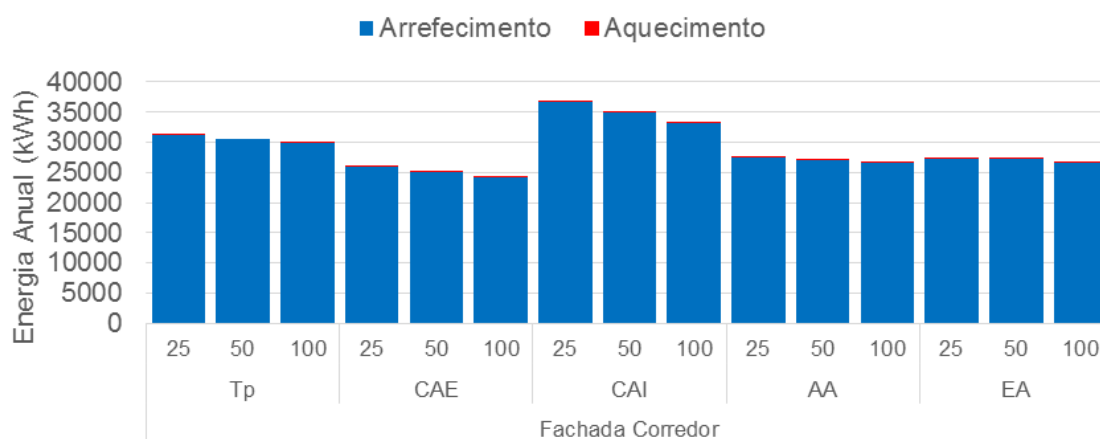


Fig. 5.13 – Energia anual associada ao sistema de AVAC de edifícios com FDP com diferentes espessuras da cavidade

Nota: Os valores apresentados no gráfico anterior incluem o efeito da ventilação mecânica.

Após a análise do gráfico, é possível retirar as seguintes conclusões:

- O aumento da espessura da caixa de ar leva a uma diminuição das necessidades de climatização do espaço interior para todos os casos de FDP simulados;
- Nas fachadas Tampão (Tp) a transição de uma cavidade de 25 centímetros para 100 centímetros conduz a uma diminuição de 4,5 % das necessidades de consumo de energia;
- Nas fachadas do tipo Cortina de Ar Exterior (CAE) verifica-se uma redução das necessidades de climatização de 7,0 % quando se aumenta a espessura da cavidade da FDP;
- No caso das fachadas do tipo Cortina de Ar Interior (CAI), verifica-se uma diminuição de 9,5 % das necessidades de consumo de energia para arrefecimento com o aumento da espessura da cavidade de 25 para 100 centímetros;
- A variação da espessura da cavidade tem pouca influência no caso de fachadas do tipo Admissão de Ar (AA) e Exaustão de Ar (EA) (variação menor a 2 %).

Torna-se interessante analisar o caudal de ventilação médio anual que se estabelece para cada tipo de fachada fazendo-se variar a espessura da sua caixa de ar. Os resultados referentes à ventilação da cavidade dos diferentes casos estudados são apresentados na Fig. 5.14.

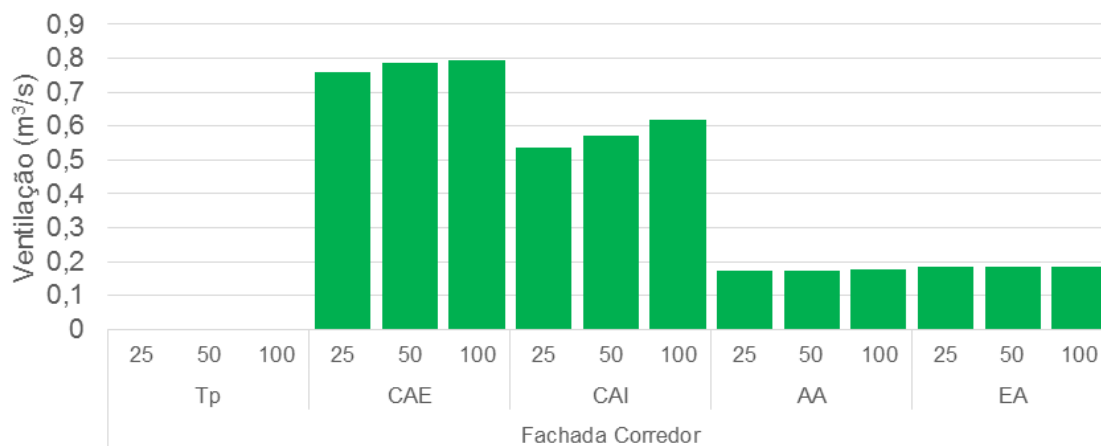


Fig. 5.14 – Caudal médio de ventilação da cavidade para FDP com diferentes espessuras da caixa de ar

Após a análise dos resultados, é possível retirar as seguintes conclusões:

- No caso da fachada do tipo Cortina de Ar Exterior (CAE) regista-se um ligeiro aumento do caudal médio ventilado de 4,5 % quando se aumenta a espessura da cavidade de 25 para 100 centímetros;
- O aumento da espessura da FDP traduz-se num aumento do caudal médio de ventilação da cavidade para o caso da fachada do tipo Cortina de Ar Interior (+15,5 %);
- Nos restantes casos, o caudal médio de ventilação não apresenta uma variação significativa (< 0,5 %).

Por fim, procurou-se avaliar a temperatura do ar na cavidade das diferentes FDP de modo a tentar compreender melhor o efeito da variação da espessura da caixa de ar. Foi simulado um ano inteiro e registados os valores da temperatura média, máxima e mínima do ar no interior da fachada de dupla pele.

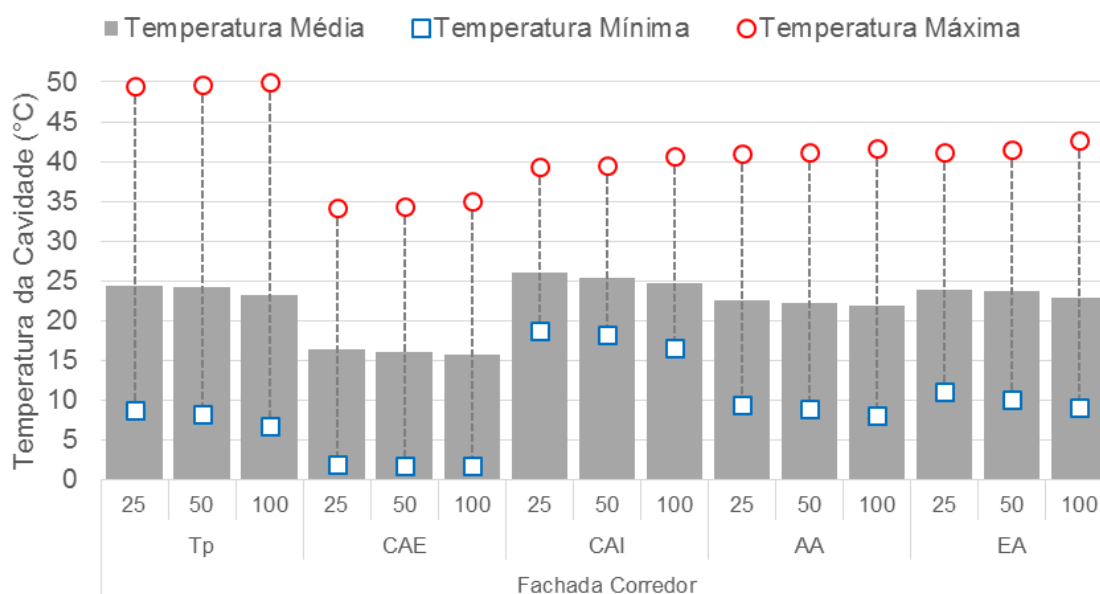
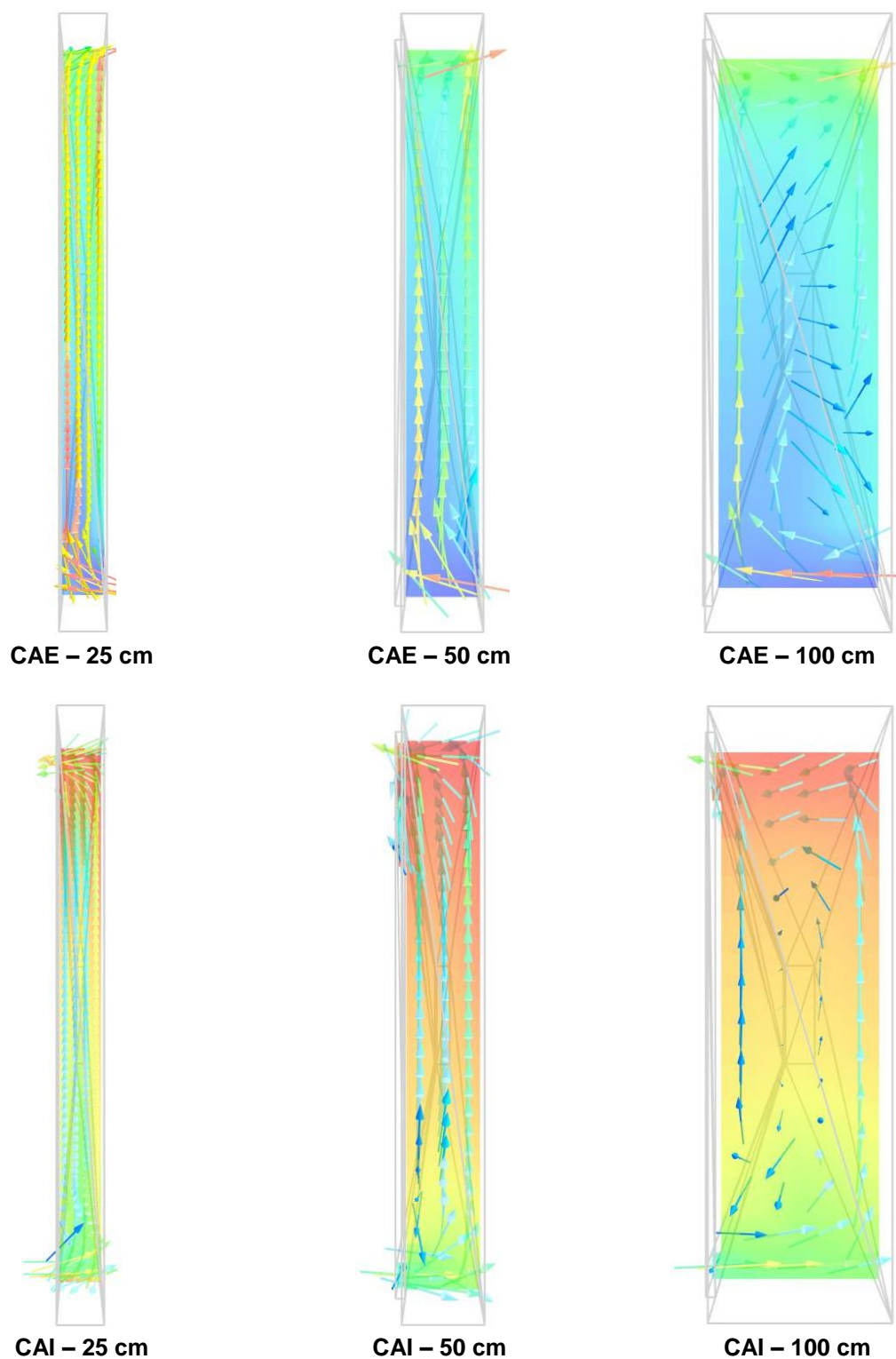


Fig. 5.15 – Temperatura média, mínima e máxima atingida no interior de FDP com diferentes espessuras da caixa de ar

A leitura do gráfico da Fig. 5.15 permite concluir que:

- De um modo geral, é observável uma diminuição da temperatura média da cavidade com o aumento da espessura da mesma. Este comportamento é mais visível nas tipologias de fachada CAE (variação de 4,2 %) e CAI (variação de 4,7 %);
- O intervalo entre o limite máximo e mínimo da temperatura tende a aumentar com o aumento da espessura da caixa de ar. Com o aumento da espessura de 25 para 100 centímetros, a temperatura máxima cresce em média 3,2 % e a temperatura mínima diminui 7,4 % na média de todas as tipologias.

Continuando o estudo das condições de temperatura e velocidade do ar dentro da cavidade para diferentes espessuras, realizou-se uma análise CFD às tipologias Cortina de Ar Exterior (CAE) e Cortina de Ar Interior (CAI), que foram as que demonstraram uma maior variação no seu comportamento com as alterações feitas anteriormente. Os resultados desta análise são os representados na Fig. 5.16.



Cor												
Temperatura (°C)	22,00	22,73	23,45	24,18	24,91	25,64	26,36	27,09	27,82	28,55	29,27	30,00
Velocidade (m/s)	0,00	0,05	0,09	0,14	0,18	0,23	0,27	0,32	0,36	0,41	0,46	0,50

Fig. 5.16 – Resultados da análise CFD de diferentes espessuras da cavidade de uma FDP



As conclusões que são possíveis retirar deste estudo são as seguintes:

- O aumento da espessura da caixa de ar das FDP estudadas traduziu-se numa diminuição da temperatura média na caixa de ar. No caso da fachada CAE a zona junto ao envidraçado interior encontra-se a uma temperatura ligeiramente inferior relativamente à região mais exterior. Na fachada CAE a distribuição da temperatura transversalmente na cavidade é mais homogénea;
- Nas tipologias de FDP analisadas o aumento da espessura da cavidade conduz a uma diminuição da velocidade de circulação do ar dentro desta. Nas cavidades mais pequenas, o escoamento do ar é laminar, enquanto que para uma espessura de 100 centímetros o escoamento se torna mais turbulento.

Após a análise de todos os resultados é possível tirar algumas conclusões gerais acerca da influência da espessura da cavidade na performance térmica de uma fachada de dupla pele:

- De um modo geral, o aumento da espessura da cavidade de uma FDP contribui para um aumento do caudal de ventilação médio anual da caixa de ar;
- O aumento do fluxo do ar que atravessa a cavidade (devido ao aumento da espessura) provoca uma diminuição da temperatura média no interior da caixa de ar, em fachadas ventiladas;
- Uma temperatura menor na cavidade significa uma maior dissipação dos ganhos internos da zona ocupada através do envidraçado interior. Isto leva a que as necessidades de arrefecimento do edifício diminuam com o aumento da espessura da cavidade de uma FDP, para o exemplo de edifício simulado.

### 5.3.3 ÁREA DAS GRELHAS DE VENTILAÇÃO

A alteração da área das aberturas destinadas à ventilação da fachada terá efeitos no caudal de ar que atravessa a cavidade e, conseqüentemente, nas necessidades de climatização do edifício. O gráfico da Fig. 5.17 mostra os consumos energéticos para aquecimento e arrefecimento correspondentes a fachadas do tipo Corredor, ventiladas com ar exterior (CAE) e interior (CAI). Nestas fez-se variar a área das grelhas de ventilação de modo a que cada uma delas ocupasse 2,5 % a 20 % da área total da fachada. São também apresentados os valores da transferência de calor anual através do envidraçado para cada caso simulado.

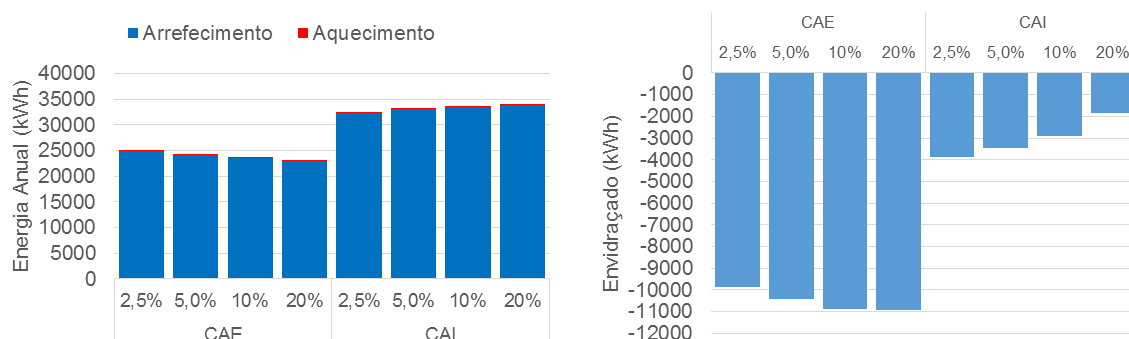


Fig. 5.17 – Energia anual associada ao sistema de AVAC de edifícios com FDP com diferentes áreas de grelhas de ventilação (à esquerda) e transferência de calor anual através do envidraçado interior (à direita)

A análise da figura anterior permite concluir que, para o tipo de edifício simulado:

- Numa fachada do tipo Cortina de Ar Exterior (CAE), um aumento de 8 vezes na área das aberturas conduz a uma diminuição de 8,2 % das necessidades de climatização do espaço interior. Esta diminuição resulta de um aumento da dissipação de calor anual através do envidraçado interior;
- O aumento da área das aberturas numa fachada do tipo Cortina de Ar Interior (CAI) traduz-se num aumento de 4,9 % das necessidades de climatização do espaço interior. Isto é consequência do aumento das trocas de ar entre a zona ocupada e a cavidade, na qual o ar está geralmente a uma temperatura superior comparativamente com o ar interior durante o dia.

De modo a tentar perceber melhor o que conduz a estas variações do consumo de energia relacionou-se a área das grelhas de admissão e exaustão de ar com o caudal de ventilação médio anual que atravessa a fachada. Os resultados desta análise estão representados na Fig. 5.18.

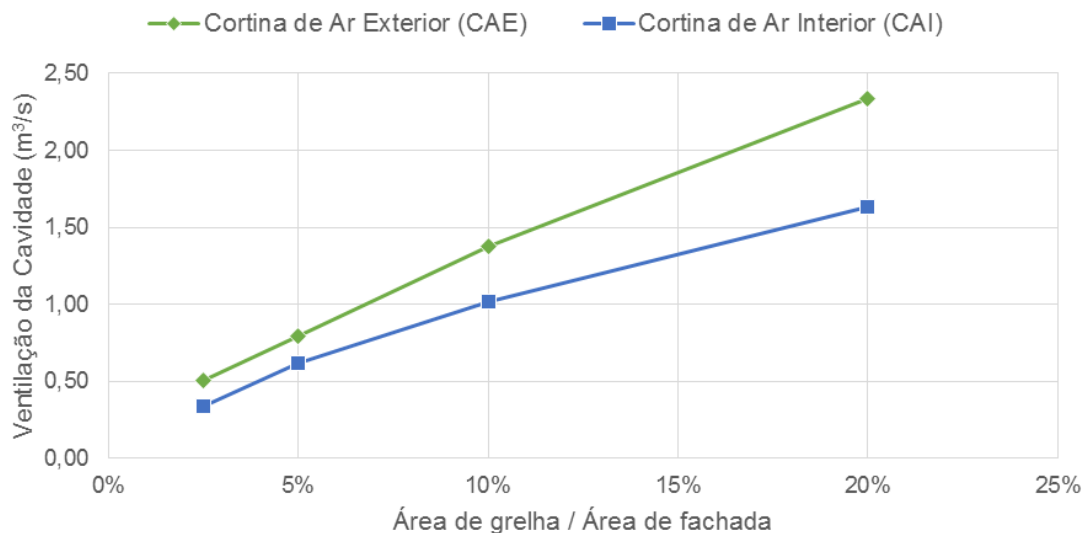


Fig. 5.18 – Variação do caudal médio de ventilação da cavidade em função da área das grelhas das aberturas na fachada

Através da leitura do gráfico anterior, conclui-se que:

- Um aumento de 8 vezes na área das aberturas traduz-se num crescimento do caudal médio de circulação de ar na cavidade de ambas as tipologias de FDP. Este aumento é de 4,6 vezes no caso de uma fachada CAE e de 4,8 vezes na fachada CAI;
- A fachada do tipo CAI apresenta uma diminuição na taxa de crescimento do caudal da ventilação no intervalo estudado, enquanto que a fachada CAE exhibe uma evolução mais linear com o aumento da área das grelhas.

O gráfico apresentado de seguida relaciona as necessidades anuais de climatização com o caudal médio de ventilação da caixa de ar ao longo do ano simulado.

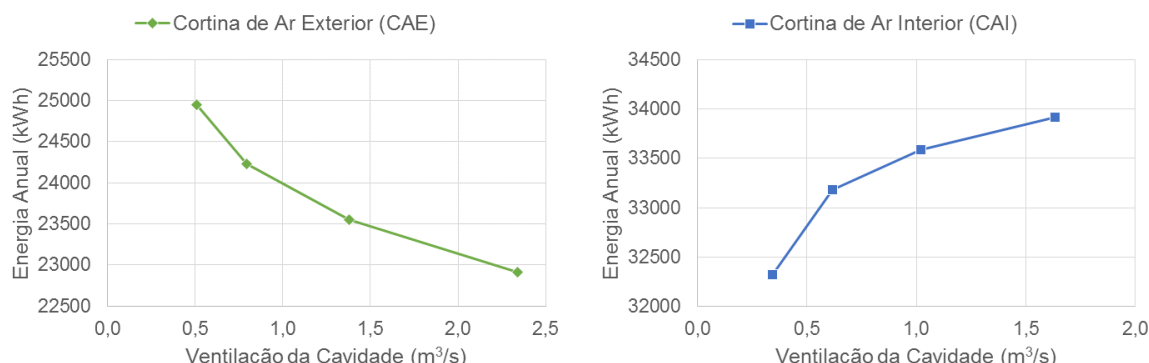


Fig. 5.19 – Variação das necessidades anuais de climatização do edifício em função do caudal médio de ventilação da cavidade para fachadas CAE (à esquerda) e CAI (à direita)

As conclusões que é possível retirar dos gráficos da Fig. 5.21 são as seguintes:

- Nas fachadas do tipo Cortina de Ar Exterior (CAE), as necessidades de climatização diminuem com o aumento do caudal de ventilação da cavidade. O aumento da ventilação média na cavidade de 0,5 m³/s para 2,3 m³/s resulta numa diminuição de 8,1 % no consumo energético;
- Nas fachadas do tipo Cortina de Ar Interior (CAI), as necessidades de climatização aumentam com o aumento do caudal de ventilação da cavidade. O aumento da ventilação média na cavidade de 0,3 m³/s para 1,6 m³/s resulta num aumento de 4,9 % no consumo energético;
- Em ambos os casos simulados verifica-se que a taxa de variação do consumo energético com climatização diminui com o aumento do caudal ventilado.

De modo a perceber melhor como é que o fluxo de ar no interior da cavidade é afetado pela área das grelhas de ventilação, foi realizada uma análise CFD para as fachadas Cortina de Ar Exterior (CAE) e Cortina de Ar Interior (CAI). Com isto pretende-se avaliar a temperatura e velocidade do ar no interior da cavidade ventilada para diferentes áreas de abertura. Os resultados desta análise são apresentados na Fig. 5.20.

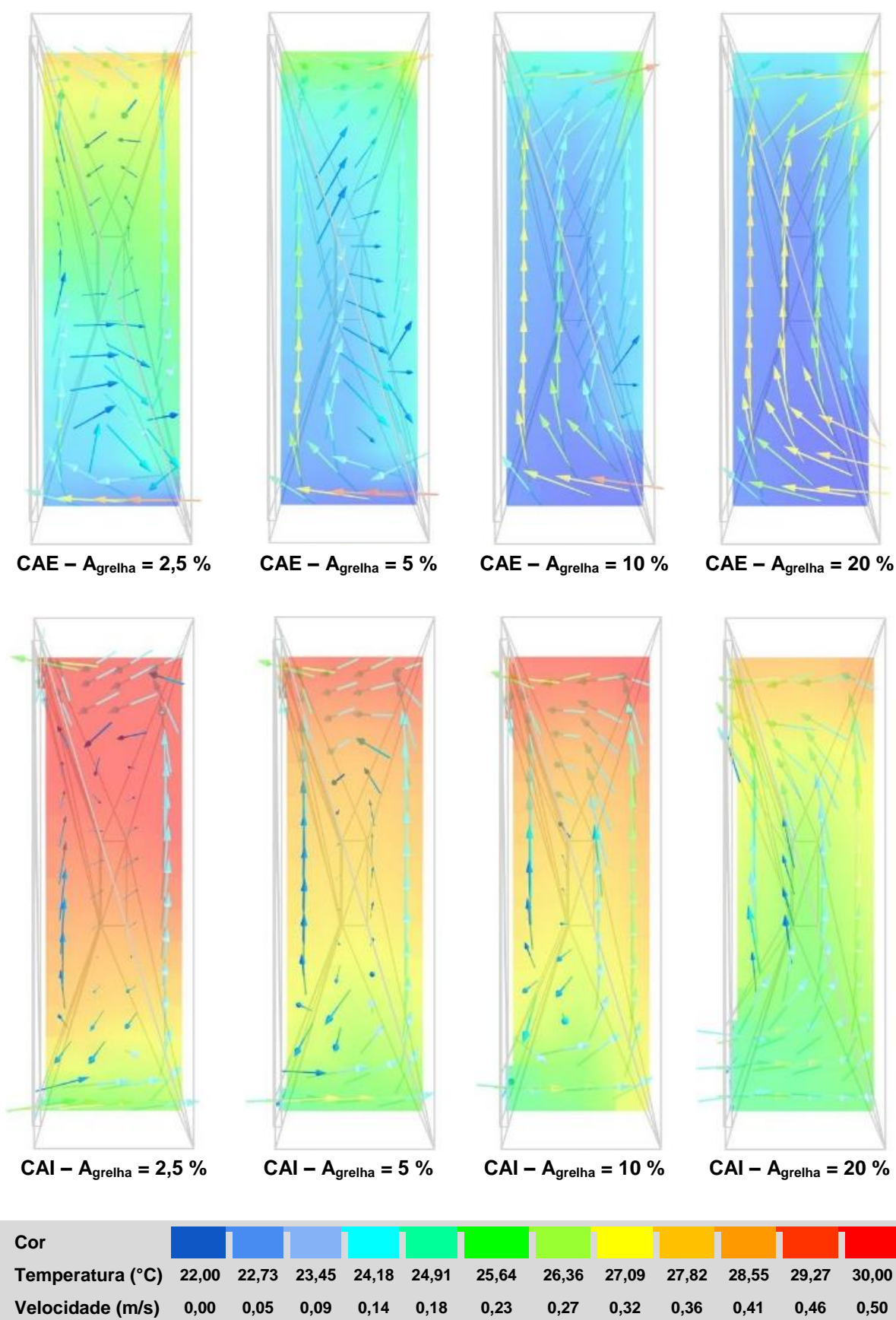


Fig. 5.20 – Resultados da análise CFD de diferentes áreas de grelha de ventilação de uma FDP

Tendo como base a observação da figura anterior, é possível concluir que:

- Na fachada do tipo CAE, o aumento da área das aberturas conduz a um maior caudal de ventilação e a uma melhor extração de calor para o exterior. Isto possibilita uma maior dissipação de calor da zona ocupada para a caixa de ar da FDP;
- Na fachada do tipo CAI, o aumento da área das aberturas conduz a um aumento do caudal de ventilação da cavidade e a uma maior admissão de calor para a zona ocupada. Isto faz com que mais ar quente seja insuflado para o edifício, contribuindo para o aumento da temperatura no espaço interior;
- Em ambos os casos, o aumento da área das grelhas de ventilação conduz a um fluxo de circulação de ar mais laminar e com uma velocidade superior.

Após a análise de todos os resultados, é possível tirar algumas conclusões gerais acerca da influência da área das grelhas de ventilação no comportamento energético do edifício simulado:

- Em ambos os casos de fachadas estudadas (CAE e CAI), um aumento da área das aberturas conduz a um aumento do caudal médio de ventilação da cavidade da FDP;
- Em fachadas ventiladas com ar exterior, o aumento do caudal que atravessa a cavidade resulta numa redução da temperatura do ar e numa maior capacidade da FDP em dissipar os ganhos internos do edifício. Isto resulta numa diminuição das necessidades de arrefecimento da zona ocupada;
- Em fachadas ventiladas com ar interior, o aumento do caudal que atravessa a caixa de ar resulta num aumento das trocas de ar entre a cavidade e o interior do edifício. Como o ar presente entre os dois panos da FDP geralmente se encontra a uma temperatura superior comparativamente com o ar interior, isto leva a um aumento das necessidades de arrefecimento da zona ocupada.

#### 5.3.4 TIPO DE VIDRO

O estudo da influência do tipo de vidro escolhido para as diferentes faces de uma FDP foi feito com recurso ao módulo de análise paramétrica incluído no DesignBuilder. Explorou-se uma situação com iluminação artificial constante, para fachadas Corredor do tipo Tampão (Tp), Cortina de Ar Exterior (CAE) e Cortina de Ar Interior (CAI). Foram realizados estudos paramétricos para uma semana de inverno (22 a 28 de janeiro) e para uma semana de verão (5 a 11 de agosto), cujos resultados são apresentados nas páginas seguintes.

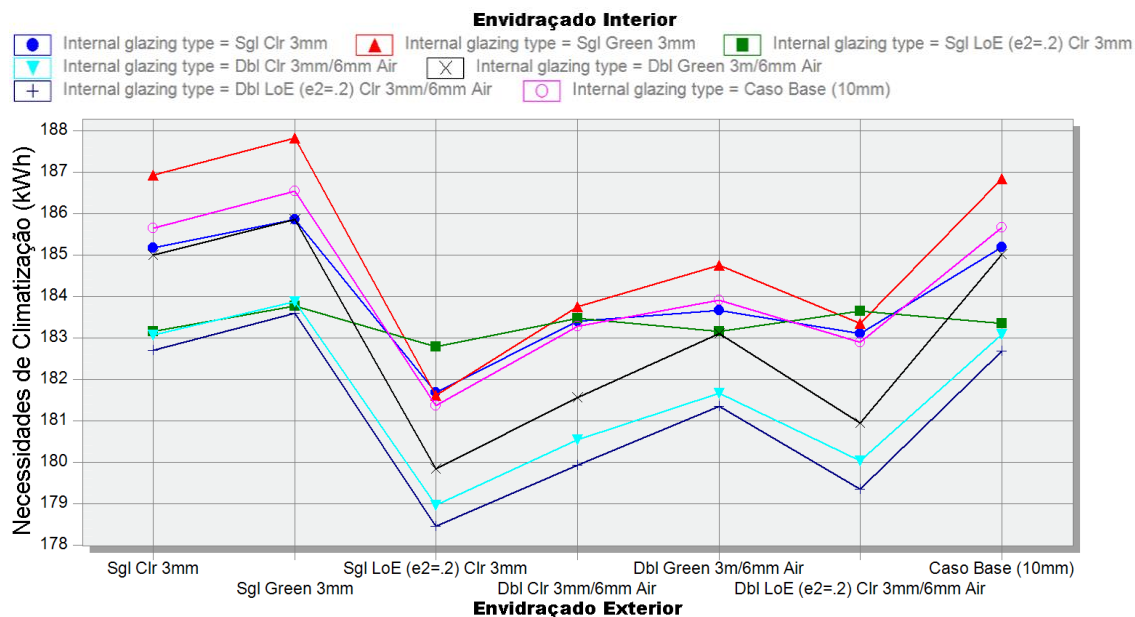


Fig. 5.21 – Consumo de energia associado a FDP do tipo Tampão, durante uma semana de inverno

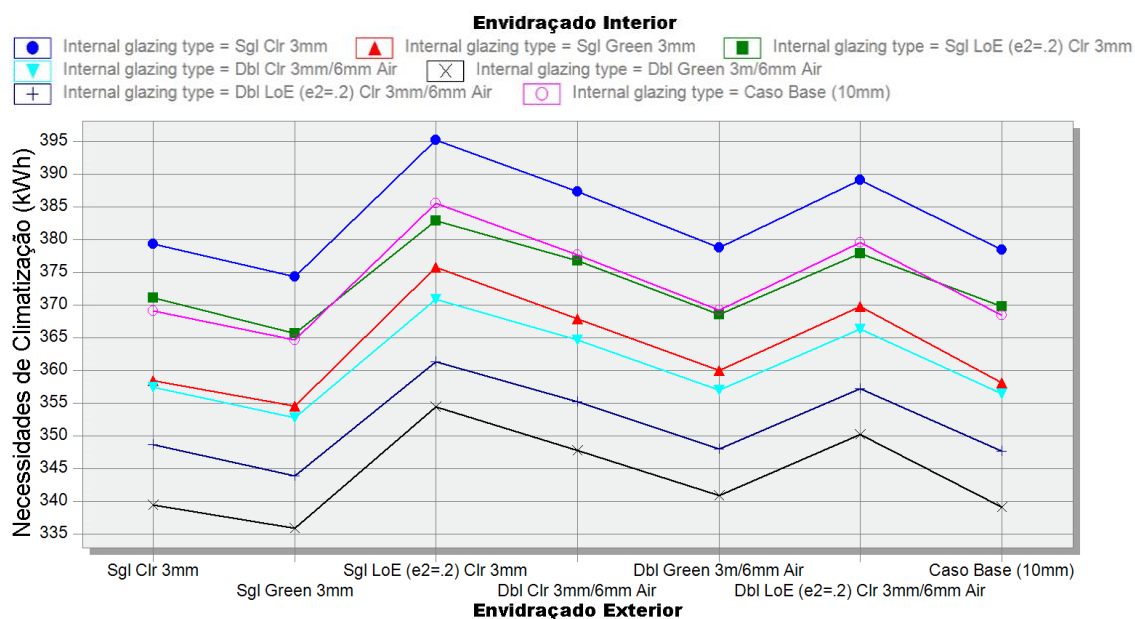


Fig. 5.22 – Consumo de energia associado a FDP do tipo Tampão, durante uma semana de verão

- Mais eficiente inverno: vidro simples de baixa emissividade pelo exterior e vidro duplo de baixa emissividade no interior;
- Menos eficiente inverno: vidro simples colorido pelo exterior e no interior;
- Mais eficiente verão: vidro simples colorido pelo exterior e vidro duplo colorido no interior;
- Menos eficiente verão: vidro simples de baixa emissividade pelo exterior e vidro simples incolor no interior;
- Entre a pior e a melhor solução obtém-se uma poupança de energia de aproximadamente 5 % na semana de inverno e 15 % durante a semana de verão.

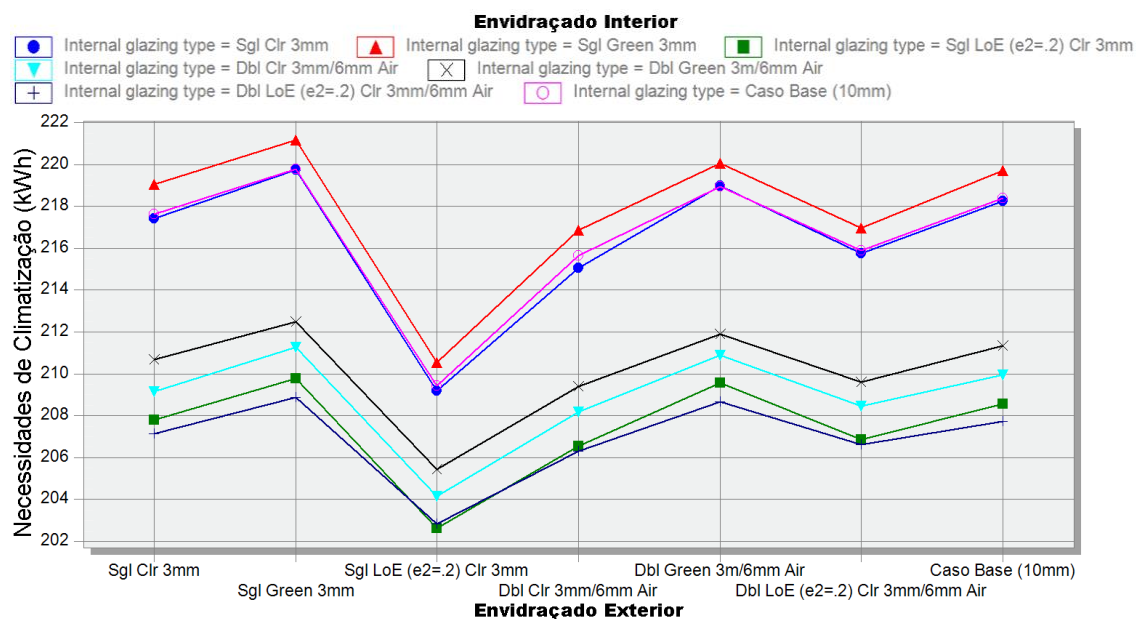


Fig. 5.23 – Consumo de energia associado a FDP do tipo CAE, durante uma semana de inverno

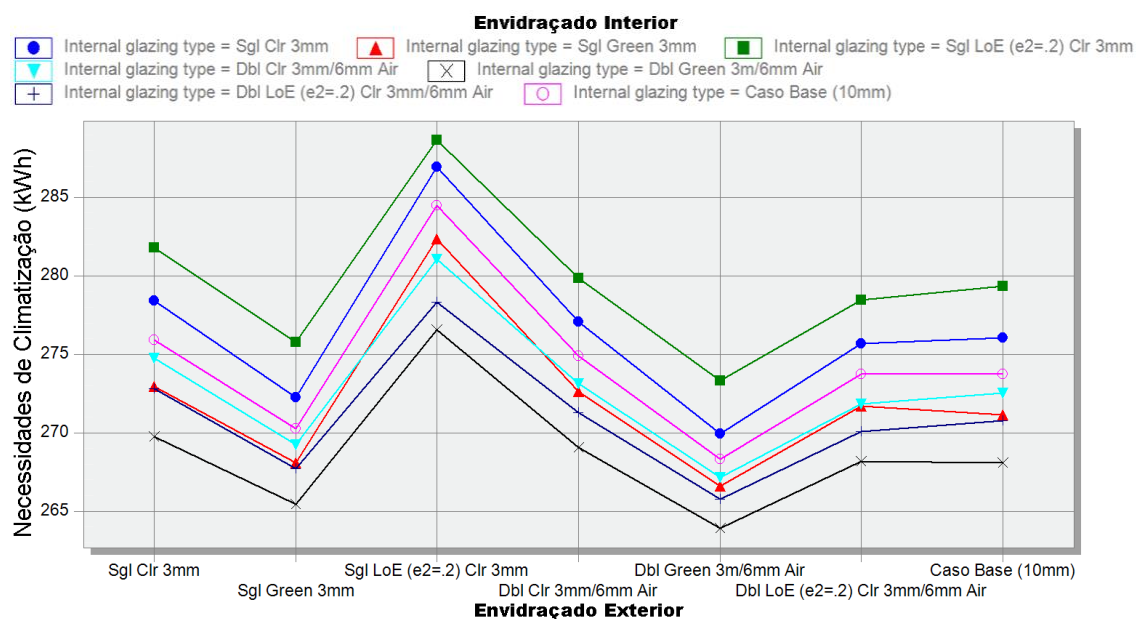


Fig. 5.24 – Consumo de energia associado a FDP do tipo CAE, durante uma semana de verão

- Mais eficiente inverno: vidro simples de baixa emissividade pelo exterior e vidro duplo de baixa emissividade no interior;
- Menos eficiente inverno: vidro simples colorido pelo exterior e no interior;
- Mais eficiente verão: vidro duplo colorido pelo exterior e no interior;
- Menos eficiente verão: vidro simples de baixa emissividade pelo exterior e no interior;
- Entre a pior e a melhor solução obtém-se uma poupança de energia de aproximadamente 8 % na semana de inverno e 8 % durante a semana de verão.



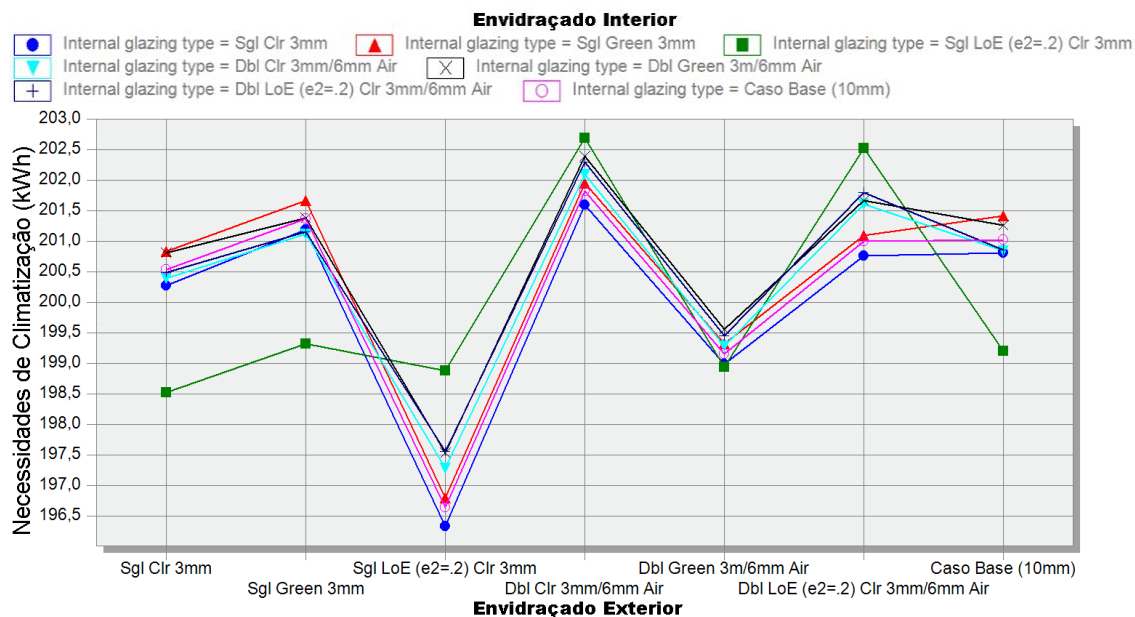


Fig. 5.25 – Consumo de energia associado a FDP do tipo CAI, durante uma semana de inverno

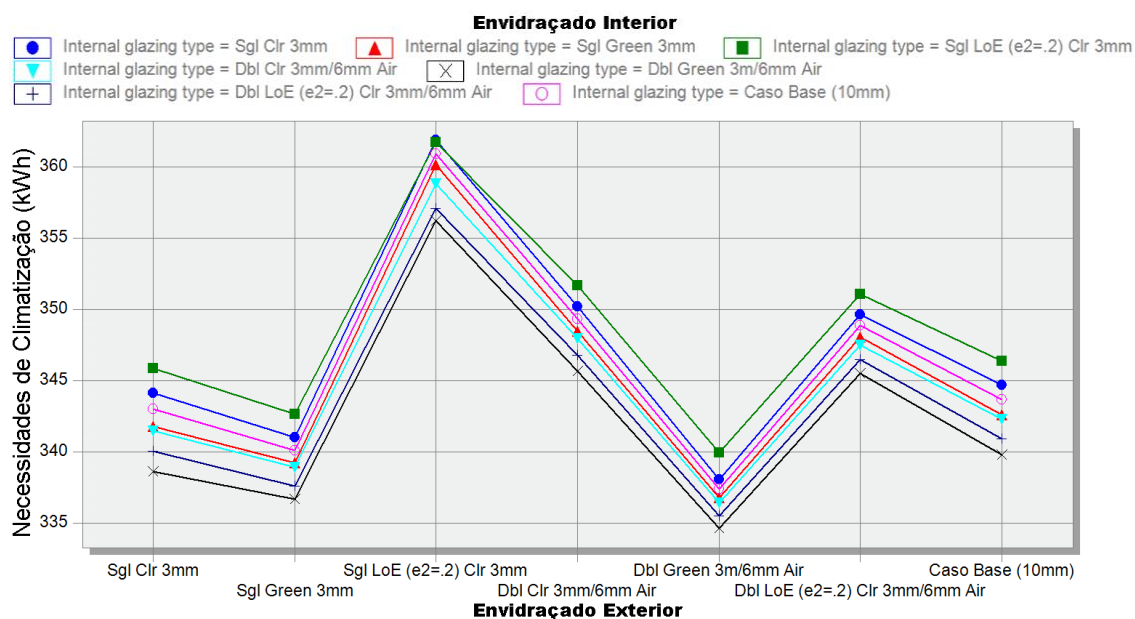


Fig. 5.26 – Consumo de energia associado a FDP do tipo CAI, durante uma semana de verão

- Mais eficiente inverno: vidro simples de baixa emissividade pelo exterior e vidro simples incolor;
- Menos eficiente inverno: vidro duplo incolor pelo exterior e vidro simples de baixa emissividade no interior;
- Mais eficiente verão: vidro duplo colorido pelo exterior e vidro duplo colorido no interior;
- Menos eficiente verão: vidro simples de baixa emissividade pelo exterior e no interior;
- Entre a pior e a melhor solução obtém-se uma poupança de energia de aproximadamente 3 % na semana de inverno e 7 % durante a semana de verão.



A informação retirada das figuras apresentadas nas páginas anteriores (Fig. 5.21 a Fig. 5.26) relativamente à eficiência das diferentes combinações de vãos envidraçados foi resumida no Quadro 5.1 e Quadro 5.2.

Quadro 5.1 – Resumo das combinações de tipos de envidraçados mais eficientes

<b>Combinação mais eficiente (vidro exterior + vidro interior)</b>		
<b>Tipo de Percurso do Fluxo de Ar</b>	<b>Semana de inverno</b>	<b>Semana de verão</b>
Tampão (Tp)	Simples baixa emissividade + Duplo baixa emissividade	Simples colorido + Duplo colorido
Cortina de Ar Exterior (CAE)	Simples baixa emissividade + Duplo baixa emissividade	Duplo colorido + Duplo colorido
Cortina de Ar Interior (CAI)	Simples baixa emissividade + Simples incolor	Duplo colorido + Duplo colorido

Quadro 5.2 – Resumo das combinações de tipos de envidraçados menos eficientes

<b>Combinação menos eficiente (vidro exterior + vidro interior)</b>		
<b>Tipo de Percurso do Fluxo de Ar</b>	<b>Semana de inverno</b>	<b>Semana de verão</b>
Tampão (Tp)	Simples colorido + Simples colorido	Simples baixa emissividade + Simples incolor
Cortina de Ar Exterior (CAE)	Simples colorido + Simples colorido	Simples baixa emissividade + Simples baixa emissividade
Cortina de Ar Interior (CAI)	Duplo incolor + Simples baixa emissividade	Simples baixa emissividade + Simples baixa emissividade

Procede-se em seguida à análise da evolução da temperatura ao longo da secção transversal da fachada de dupla pele, através dos resultados das temperaturas superficiais (exterior e interior) dos dois vãos envidraçados. A apresentação dos resultados foi dividida em três gráficos, um para cada tipologia de fachada estudada (Tp, CAE e CAI). Em cada gráfico são apresentadas quatro linhas de variação da temperatura:

- $T_{\min}$  (M) – temperatura mínima atingida na FDP com a combinação de tipos de envidraçado mais eficiente para a semana de inverno;
- $T_{\min}$  (P) – temperatura mínima atingida na FDP com a combinação de tipos de envidraçado menos eficiente para a semana de inverno;
- $T_{\max}$  (M) – temperatura máxima atingida na FDP com a combinação de tipos de envidraçado mais eficiente para a semana de verão;
- $T_{\max}$  (P) – temperatura máxima atingida na FDP com a combinação de tipos de envidraçado menos eficiente para a semana de verão.

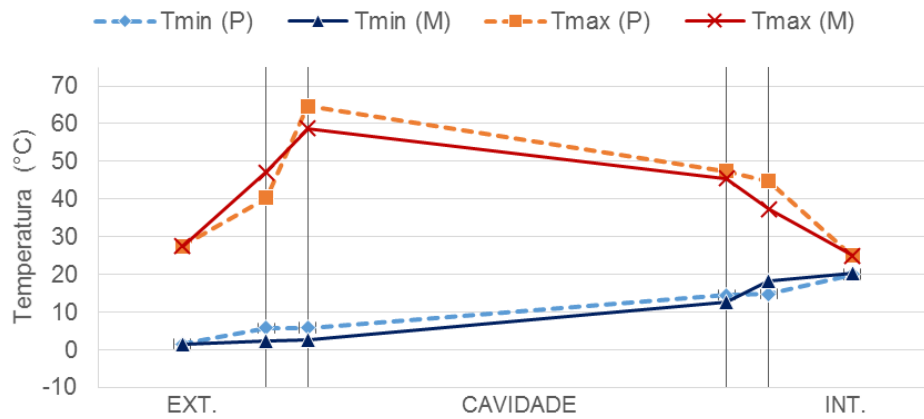


Fig. 5.27 – Variação da temperatura no interior da cavidade de uma fachada do tipo Tampão para várias combinações de vidro diferentes

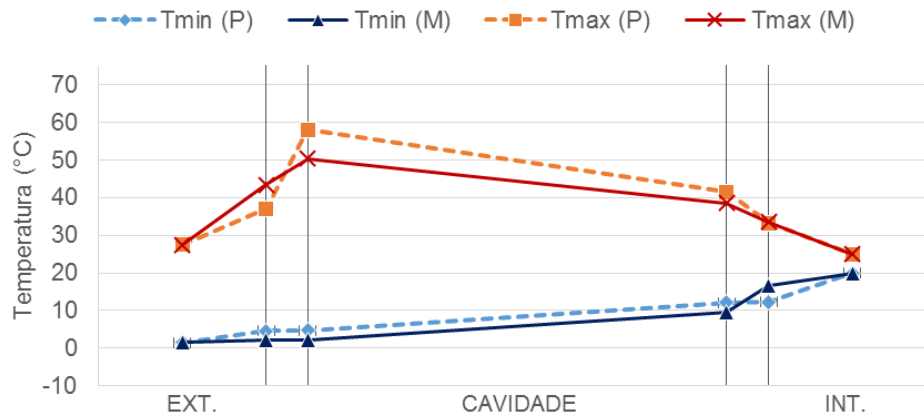


Fig. 5.28 – Variação da temperatura no interior da cavidade de uma fachada do tipo Cortina de Ar Exterior para várias combinações de vidro diferentes

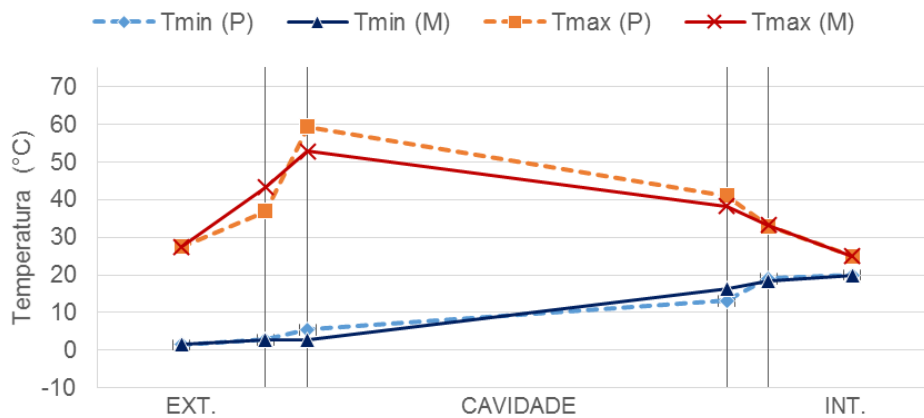


Fig. 5.29 – Variação da temperatura no interior da cavidade de uma fachada do tipo Cortina de Ar Interior para várias combinações de vidro diferentes

Comparando a melhor combinação (M) e a pior combinação (P) de envidraçados para cada tipologia através da análise da Fig. 5.27, Fig. 5.28 e Fig. 5.29, conclui-se que:

- Na semana de verão, as melhores soluções de envidraçado [ $T_{\max}$  (M)] permitem uma diminuição da temperatura na cavidade de até 7 °C comparativamente com a pior combinação [ $T_{\max}$  (P)]. Deste modo, a escolha correta do tipo de vidro a utilizar traduz-se numa menor transferência de calor para a zona ocupada e, conseqüentemente, numa redução das necessidades de arrefecimento;
- Na semana de inverno, a diferença de temperatura na cavidade entre a melhor combinação [ $T_{\min}$  (M)] e a pior combinação [ $T_{\min}$  (P)] é menos significativa. No entanto, verifica-se que a escolha correta da combinação de tipos de vidro possibilita um melhor arrefecimento da cavidade durante a noite, atingindo-se em média uma diferença de 3 °C entre a melhor e a pior solução.

Após a análise de todos os resultados, é possível tirar algumas conclusões gerais acerca da influência de diferentes tipos de vidro em fachadas de dupla pele:

- Durante a semana de inverno, os tipos de envidraçado que conduzem a uma menor necessidade de climatização são vidros de baixa emissividade em ambos os panos da FDP. No pano exterior é mais interessante a utilização de vidros simples, enquanto que pelo interior os vidros duplos são a melhor solução. Como o caso estudado se trata de um edifício com um nível elevado de ganhos internos, no inverno torna-se fundamental maximizar dissipação de calor da cavidade, de modo a evitar o seu sobreaquecimento, tomando partido das baixas temperaturas que se registam no ambiente exterior. Para tal, deve-se escolher um vidro simples para o pano exterior da fachada, pois estes possuem uma maior condutância (k) comparativamente com os vidros duplos;
- Durante a semana de verão, a combinação de envidraçados que conduz a uma menor necessidade de climatização corresponde à utilização de um vidro duplo colorido em ambos os panos da FDP. Isto demonstra a importância de minimizar os ganhos solares durante a estação de arrefecimento. De todos os tipos de vidro usados neste estudo paramétrico, os vidros duplos coloridos são os que possuem um fator solar ( $g_{\perp}$ ) menor e, como tal, são os mais apropriados para este efeito.

Importa referir que, além da performance térmica da fachada, existem outros fatores que influenciam a escolha dos tipos de vidro a utilizar num edifício. Para além da vertente económica, as características dos envidraçados relacionadas com a transmissão de luz solar podem assumir uma grande importância ao nível do consumo energético total do edifício. A opção por vidros coloridos ou de baixa emissividade (que admitem uma menor transmissão luminosa) faz com que seja necessário um maior consumo de energia com iluminação artificial, de modo a atingir os níveis de luz pretendidos no interior do edifício. Assim sendo, é indispensável ponderar uma série de variáveis diferentes na escolha dos tipos de vidro mais adequados a cada fachada de dupla pele.

## 5.4. INFLUÊNCIA DO AMBIENTE INTERIOR E EXTERIOR

### 5.4.1 GANHOS INTERNOS

Fez-se variar os ganhos internos associados às tipologias Tampão (Tp), Cortina de Ar Exterior (CAE) e Cortina de Ar Interior (CAI) previamente simuladas para uma FDP do tipo Corredor de modo a aferir as consequências que essa alteração teria nas necessidades de climatização de um edifício localizado na cidade do Porto (Portugal).

A Fig. 5.30 representa as necessidades de consumo de energia para diferentes níveis de ganhos internos das fachadas seleccionadas, em que “100%” corresponde aos ganhos internos estabelecidos para o modelo base no Capítulo 3.

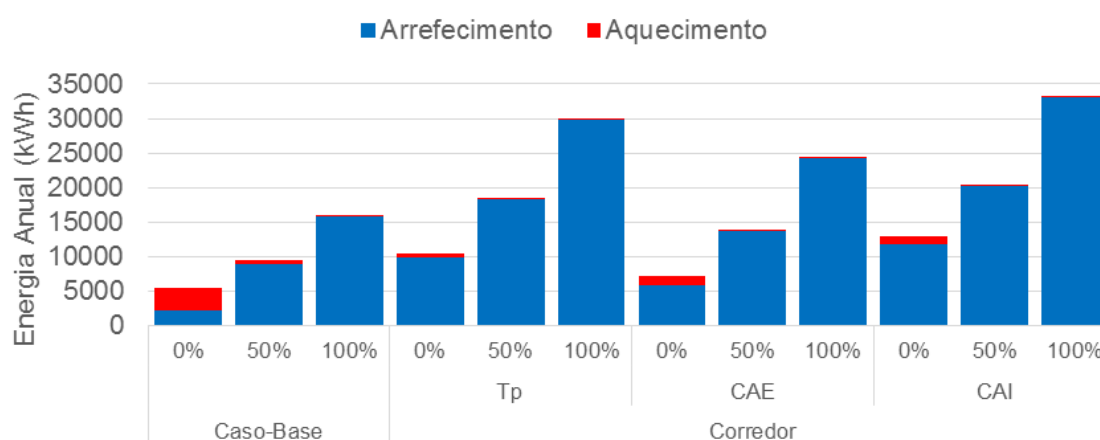


Fig. 5.30 – Energia anual associada ao sistema de AVAC de edifícios com diferentes níveis de ganhos internos

Nota: Os valores apresentados no gráfico anterior incluem o efeito da ventilação mecânica.

Através da análise do gráfico anterior é possível concluir que:

- A diminuição dos ganhos internos traduz-se numa diminuição geral das necessidades de climatização em todos os casos simulados;
- A diminuição dos ganhos internos conduz a uma diminuição das necessidades de arrefecimento e a um aumento das necessidades de aquecimento do espaço interior;
- O caso base de uma fachada de vidro simples apresenta menores necessidades de climatização para os três níveis de ganhos internos analisados.

Torna-se interessante o estudo da comparação da taxa de variação das necessidades de climatização de cada fachada de dupla pele com os dados de saída obtidos para a simulação do caso base de uma fachada envidraçada simples. Esta análise foi realizada e os resultados são os apresentados no Quadro 5.3.

Quadro 5.3 – Taxa de variação das necessidades de climatização das diferentes FDP relativamente ao caso base

Tipo de Fachada	Percentagem de Ganhos Internos	Taxa de Variação em Relação ao Mesmo Nível de Ganhos Internos do Caso Base
Caso Base	100 %	—
	50 %	—
	0 %	—
Corredor Tp	100 %	+87 %
	50 %	+85 %
	0 %	+63 %
Corredor CAE	100 %	+52 %
	50 %	+39 %
	0 %	+12 %
Corredor CAI	100 %	+108 %
	50 %	+105 %
	0 %	+102 %

A partir da leitura do quadro anterior é possível concluir que:

- O tipo de fachada que obtém os piores resultados ao nível das necessidades de energia para climatização é o Cortina de Ar Interior (CAI);
- À medida que diminuem os ganhos internos, os resultados obtidos com FDP aproximam-se dos do caso base. Isto é mais evidente no caso da fachada Cortina de Ar Exterior (CAE), na qual os gastos com a climatização do espaço interior representam apenas um aumento de 12 % relativamente a uma fachada envidraçada simples, quando os ganhos de calor no interior são nulos.

Após a análise de todos os resultados é possível tirar algumas conclusões gerais acerca da influência dos ganhos internos na performance térmica de um edifício com fachada de dupla pele:

- As fachadas de dupla pele simuladas na cidade do Porto tendem a ser mais eficientes para edifícios com um menor nível de ganhos internos. Isto acontece porque a introdução de um segundo pano envidraçado na fachada dificulta a dissipação de calor da zona interior do edifício;
- A fachada do tipo Cortina de Ar Exterior (CAE) é a que sofre uma melhoria mais significativa no que toca à diminuição das necessidades de climatização com a diminuição dos ganhos internos, enquanto que no tipo Cortina de Ar Interior (CAI) esta variação é mais subtil.

#### 5.4.2 ORIENTAÇÃO DA FACHADA

De modo a estudar a variação do comportamento de uma fachada de dupla pele para diferentes orientações (Norte, Este, Sul, Oeste) aplicou-se uma rotação ao modelo do edifício definido inicialmente no DesignBuilder, de modo a que o plano da fachada envidraçada estivesse perpendicular a um dos quatro pontos cardeais principais. Os resultados do consumo de energia do edifício para cada caso são representados na Fig. 5.31.

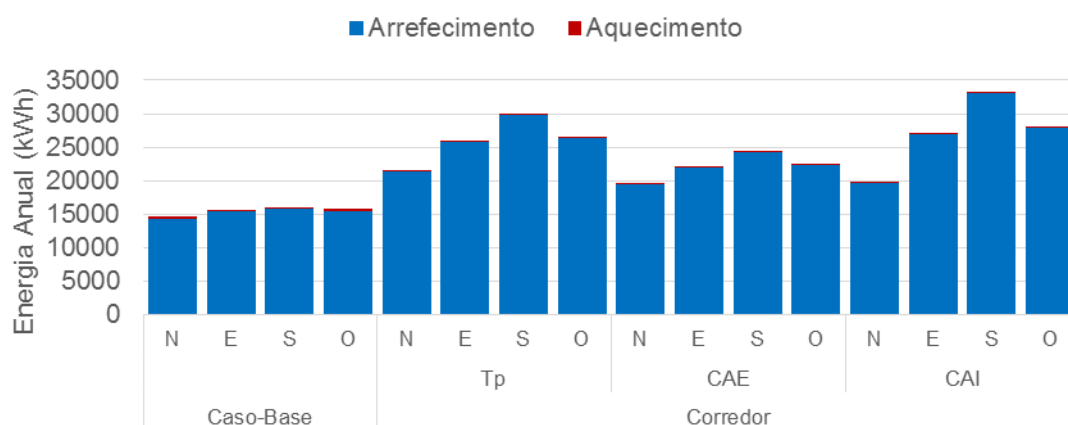


Fig. 5.31 – Energia anual associada ao sistema de AVAC de um edifício para diferentes orientações da FDP

Nota: Os valores apresentados no gráfico anterior incluem o efeito da ventilação mecânica.

Após a análise dos resultados, é possível tirar as seguintes conclusões:

- O consumo de energia para climatização é máximo para as fachadas orientadas a Sul e mínimo para as fachadas orientadas a Norte;
- O consumo de energia para climatização é aproximadamente igual nas fachadas orientadas a Este e a Oeste (diferença < 4 %);
- A diferença entre o consumo de energia das orientações Sul e Norte é maior para as fachadas do tipo Cortina de Ar Interior (CAI), correspondendo a uma variação de 40,8 %. Esta diferença é menor no caso da fachada simples (Caso Base), correspondendo a uma variação de apenas 9,1 %.

Também se estudou a variação dos ganhos solares de modo a perceber em que medida é que estes podem estar relacionados com a performance da fachada – ver Fig. 5.32.

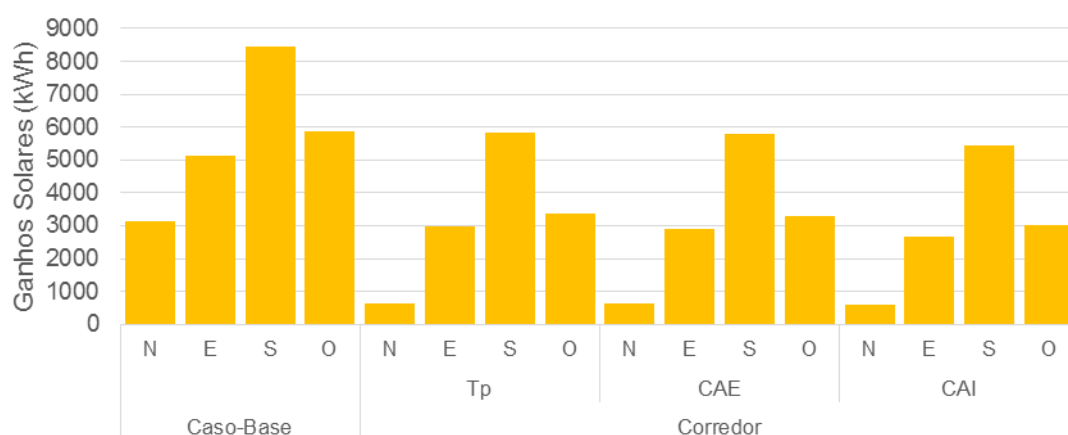


Fig. 5.32 – Ganhos solares de um edifício para diferentes orientações da FDP

A partir da análise dos ganhos solares é possível concluir que:

- O Caso Base, com uma fachada envidraçada simples, tem em média 45 % mais ganhos solares do que as tipologias de FDP analisadas;
- A orientação Sul é a que regista maiores valores de ganhos solares anuais, seguida da Oeste, Este e Norte. A alteração da orientação da fachada de dupla pele de Norte para Sul resulta num aumento dos ganhos solares de 8,4 vezes (em média);
- A relação entre os valores dos ganhos solares obtidos para as várias orientações são semelhantes nas diferentes tipologias de fachada simuladas.

As condições de ventilação da cavidade também estão dependentes da orientação da fachada, como é perceptível na Fig. 5.33.

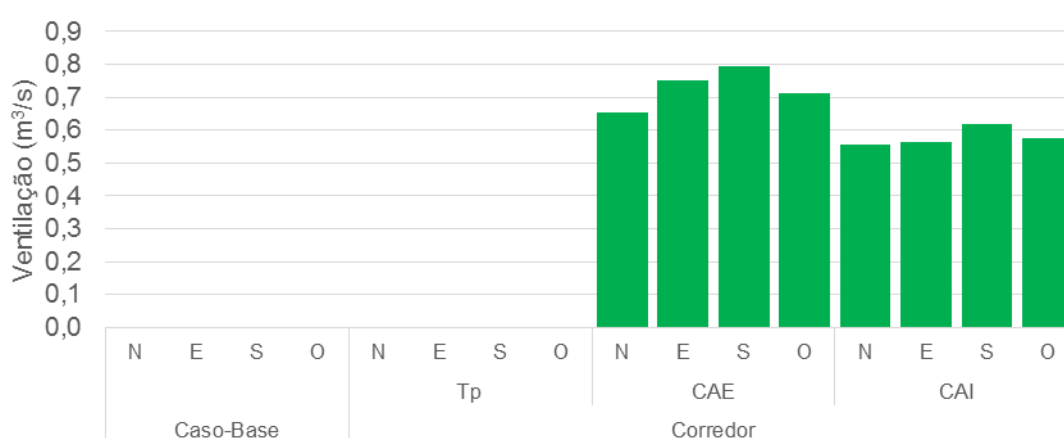


Fig. 5.33 – Caudal médio de ventilação da cavidade para diferentes orientações da FDP

A análise do gráfico anterior permite concluir que:

- As fachadas com um maior caudal médio anual de ventilação são as orientadas a Sul, enquanto que as orientadas a Norte têm um menor caudal. Esta relação estabelece-se em ambas as fachadas, quer seja ventilada com ar exterior (CAE) ou com ar interior (CAI), o que significa que realça o contributo do efeito chaminé para a ventilação da cavidade;
- As fachadas Cortina de Ar Exterior têm um caudal médio de ventilação superior ao das fachadas Cortina de Ar Interior devido à soma da contribuição da ação do vento.

Após a análise de todos os resultados, é possível tirar algumas conclusões gerais acerca do comportamento das fachadas de dupla pele simuladas para diferentes orientações:

- A orientação Sul é a que se traduz numa maior necessidade de arrefecimento do espaço interior devido aos ganhos solares serem mais elevados;
- A alteração da orientação e, consequentemente, do valor dos ganhos solares traduz-se num maior aumento das necessidades de climatização para as fachadas do tipo Tampão (Tp) e Cortina de Ar Interior (CAI), que não são ventiladas com ar exterior;
- Na fachada simples e na FDP do tipo Cortina de Ar Exterior (CAE), a mudança de orientação produz um efeito menos palpável na variação nas necessidades de climatização. Isto acontece pois nestes casos o aumento nos ganhos solares é “compensado” de forma mais eficiente pela

ventilação da cavidade que ajuda a diminuir a temperatura na caixa de ar e, consequentemente, permite uma melhor dissipação de calor para o exterior através do envidraçado.

#### 5.4.3 AJUSTE AO CLIMA

De modo a comparar o comportamento das fachadas de dupla pele já simuladas quando inseridas em locais com climas distintos do do Porto, voltou-se a simular algumas destas tipologias para as cidades de Helsínquia (Finlândia) e Atenas (Grécia). Os resultados das necessidades de climatização são apresentados na figura seguinte:

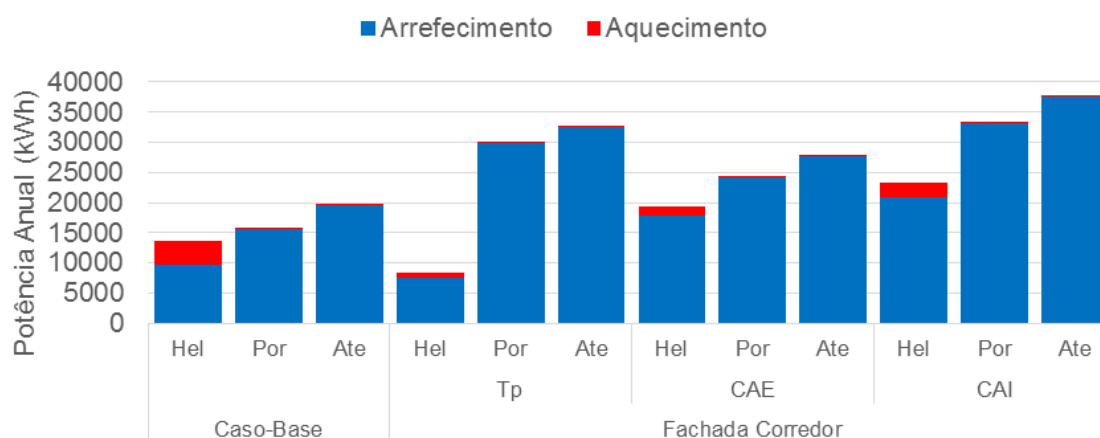


Fig. 5.34 – Energia anual associada ao sistema de AVAC de edifícios com FDP localizados em diferentes cidades europeias

Nota: Os valores apresentados no gráfico anterior incluem o efeito da ventilação mecânica.

Após a leitura do gráfico, podem-se tirar as seguintes conclusões:

- A cidade de Helsínquia apresenta uma maior necessidade de energia para aquecimento, enquanto que Atenas revela uma maior necessidade de energia para arrefecimento;
- A adoção de uma fachada de dupla pele do tipo Tampão possibilita uma poupança de 37,9 % de energia de climatização para o clima de Helsínquia, comparativamente com uma fachada de vidro tradicional;
- Para os climas do Porto e de Atenas, a aplicação de uma FDP não se traduz numa poupança efetiva de energia no exemplo de edifício simulado.



Foram também analisadas as trocas de calor através do envidraçado para os três climas seleccionados. Os resultados deste estudo estão representados na Fig. 5.35.

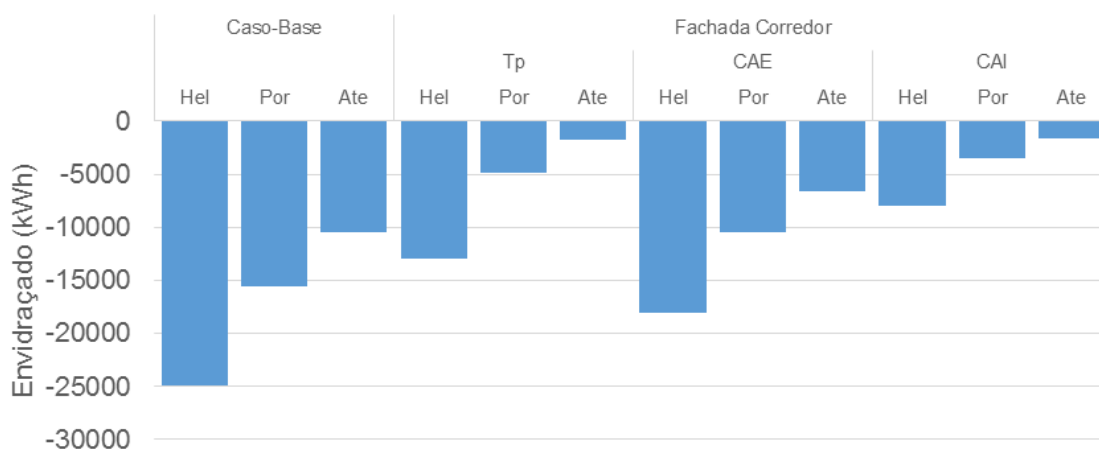


Fig. 5.35 – Transferência de calor através do envidraçado de edifícios com FDP localizados em diferentes cidades europeias

A leitura do gráfico permite concluir que:

- No clima de Helsínquia as temperaturas baixas fazem com que se observe uma perda de calor em média 1,6 e 2,4 vezes superior aos casos simulados para o clima do Porto e de Atenas, respetivamente;
- A aplicação de uma fachada de dupla pele faz diminuir em média cerca de 60 % a transferência de calor do interior do edifício para o exterior. As fachadas Tampão e Cortina de Ar Interior são aquelas em que esta diminuição é mais significativa;
- A fachada Cortina de Ar Exterior, por ser ventilada com ar proveniente do exterior, é a que revela um comportamento mais semelhante ao do Caso Base, ao nível das perdas de calor através do envidraçado.

Após a análise de todos os resultados, é possível tirar algumas conclusões gerais acerca da influência dos ganhos internos na performance térmica de um edifício com fachada de dupla pele:

- Em casos como o simulado, em que a totalidade dos ganhos internos constitui uma parcela importante do balanço energético do edifício, climas com uma temperatura média anual inferior possibilitam uma melhor dissipação de calor da zona ocupada, diminuindo assim as necessidades de arrefecimento;
- As FDP são mais indicadas para climas mais frios, nos quais o aumento da temperatura do ar na cavidade se traduz numa redução das trocas de calor através do envidraçado interior e, consequentemente, numa diminuição das necessidades de aquecimento da zona ocupada.

#### 5.4.4 NÚMERO DE FACHADAS ENVIDRAÇADAS

Todos os resultados apresentados anteriormente dizem respeito a casos de estudo com apenas uma fachada envidraçada. De modo a tentar compreender melhor como se comporta um edifício com toda a envolvente exterior envidraçada, foram feitas novas simulações para o caso de uma fachada de vidro simples e para fachadas de dupla pele do tipo Multi-Piso.

A primeira análise que é feita diz respeito a um edifício com quatro fachadas de vidro simples. Este caso pode ser comparado com o modelo base simulado no subcapítulo 5.2. Os resultados desta análise são apresentados de seguida:

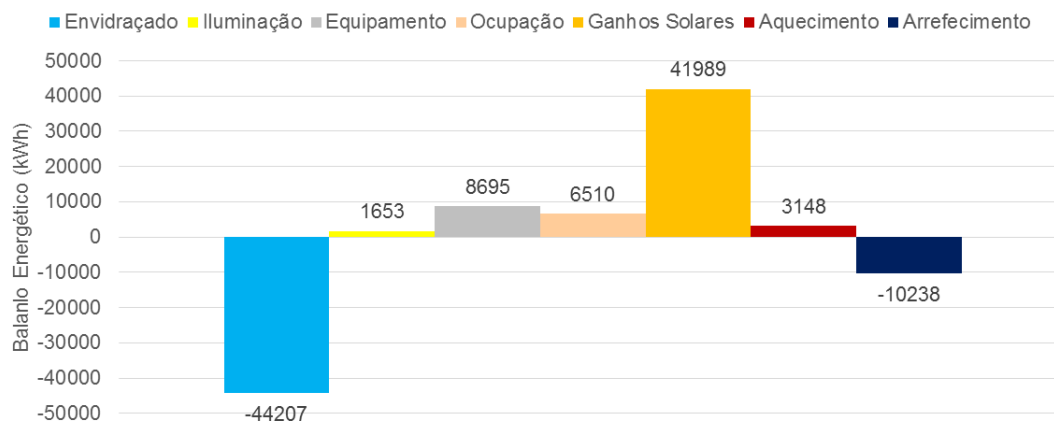


Fig. 5.36 – Balanço energético anual de um edifício com quatro fachadas envidraçadas simples

A partir da análise da Fig. 5.36 (e comparando os seus valores com os da Fig. 5.2) é possível tirar as seguintes conclusões:

- Aumentando o número de fachadas envidraçadas (de uma para quatro) o valor dos ganhos solares cresce cerca de 5 vezes;
- Os níveis de energia gastos com a iluminação artificial do espaço interior diminuem para 1/4, quando se quadruplica a área da envolvente exterior transparente;
- As trocas de calor através do envidraçado aumentam 185 %, relativamente ao caso com apenas uma fachada envidraçada;
- Os consumos anuais de energia com aquecimento aumentam 2 930 kWh quando se aumenta o número de fachadas envidraçadas e as necessidades de arrefecimento diminuem 5 496 kWh.

A Fig. 5.37 mostra as necessidades energéticas para aquecimento e arrefecimento, os ganhos solares e a transmissão de calor através das diferentes fachadas de dupla pele estudadas.

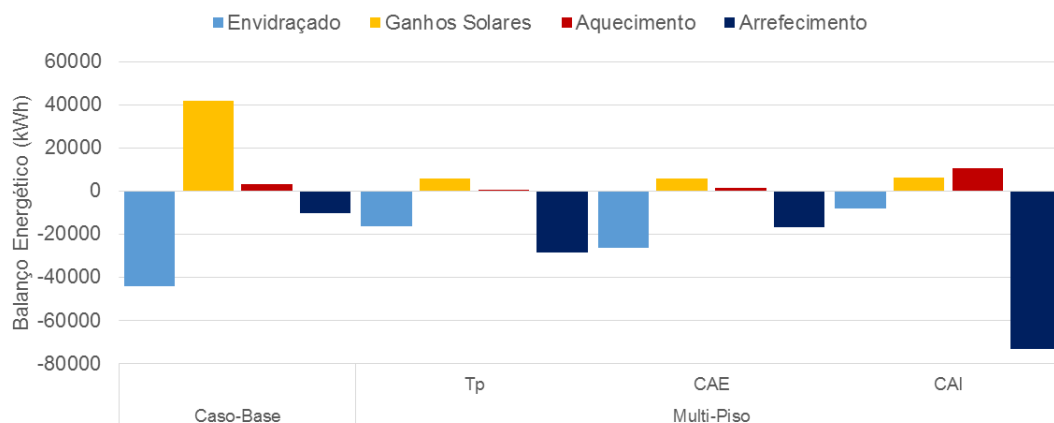


Fig. 5.37 – Balanço energético anual de edifícios com quatro fachadas de dupla pele

Após a análise de todos os resultados é possível tirar algumas conclusões gerais acerca da performance térmica de um edifício com toda a envolvente exterior envidraçada:

- Todas as tipologias de fachada de dupla pele apresentam maiores necessidades de climatização totais (aquecimento + arrefecimento) relativamente ao modelo de quatro fachadas envidraçadas simples (Caso Base);
- Na simulação do Caso Base as perdas através do envidraçado são 2,6 vezes superiores aos obtidos nas simulações com FDP;
- Os ganhos solares em edifícios com fachadas envidraçadas simples são aproximadamente 7 vezes superiores aos obtidos nas simulações com FDP;
- A tipologia de FDP que apresenta melhores resultados do ponto de vista do consumo de energia é a Cortina de Ar Exterior, cujas necessidades de climatização são 1,6 e 4,5 vezes inferiores quando comparada com uma fachada do tipo Tampão e Cortina de Ar interior, respetivamente;
- Numa fachada Tp, a passagem de 1 para 4 fachadas envidraçadas traduz-se num aumento de 598 kWh para aquecimento e numa redução de 19 590 kWh para arrefecimento;
- Numa fachada CAE, a passagem de 1 para 4 fachadas envidraçadas traduz-se num aumento de 1 286 kWh para aquecimento e numa redução de 15 316 kWh para arrefecimento;
- Numa fachada CAI, a passagem de 1 para 4 fachadas envidraçadas traduz-se num aumento de 9 263 kWh para aquecimento e numa redução de 15 279 kWh para arrefecimento.

## 5.5. SÍNTESE DO CAPÍTULO

De modo a resumir a informação apresentada ao longo de todo este capítulo e a sintetizar as conclusões retiradas de cada grupo de simulações, agregou-se toda esta informação no Quadro 5.4.

Quadro 5.4 – Síntese das conclusões retiradas dos diferentes cenários simulados

	Cenários Estudados	Conclusões
<b>Geometria</b>	Confinada	No modelo de edifício simulado, a fachada do tipo Multi-Piso é a que apresenta menores consumos de energia para climatização.
	Corredor	
	Chaminé	
	Multi-Piso	
<b>Percurso do Fluxo de Ar na Cavidade</b>	Tampão	A fachada com o esquema de ventilação Cortina de Ar Exterior é a que está associada a um menor consumo energético para todas as geometrias de FDP. Para o tipo de edifício simulado a fachada Tampão é a que conduz a uma maior necessidade de arrefecimento do espaço interior.
	Cortina de Ar Exterior	
	Cortina de Ar Interior	
	Admissão de Ar	
	Exaustão de Ar	
<b>Espessura da Cavidade</b>	25 cm	Nos exemplos de fachada de dupla pele estudados o aumento da espessura da caixa de ar conduz a uma diminuição das necessidades de climatização do edifício.
	50 cm	
	100 cm	
<b>Área das Grelhas de Ventilação</b>	1,5 m <sup>2</sup>	Para o tipo de edifício simulado, o aumento das áreas das aberturas da fachada contribuem para a diminuição das necessidades de arrefecimento em FDP ventiladas com ar exterior (e.g. Cortina de Ar Exterior).
	3,0 m <sup>2</sup>	
	6,0 m <sup>2</sup>	
	12,0 m <sup>2</sup>	
<b>Tipo de vidro</b>	Simples Incolor	Durante o inverno, as soluções mais interessantes passam pela utilização de um vidro simples na face exterior (de modo a maximizar a dissipação de calor da fachada) e um vidro simples ou duplo na face interior no caso de a fachada ser ventilada com ar interior (CAI) ou com ar proveniente do exterior (CAE), respetivamente.
	Simples Colorido	
	Simples Baixa Emissividade	
	Duplo Incolor	Durante o verão, o principal objetivo é a redução dos ganhos solares que é conseguida de forma mais eficiente com vidros com um fator solar baixo em ambos os panos da fachada (vidros duplos coloridos).
	Duplo Colorido	
	Duplo Baixa Emissividade	
<b>Ganhos Internos</b>	0 %	Para um clima como o da cidade do Porto, as fachadas de dupla pele têm um comportamento mais interessante para edifícios com um nível baixo de ganhos internos.
	50 %	
	100 %	
<b>Orientação da Fachada</b>	Norte	As fachadas orientadas a Sul revelam uma maior necessidade de climatização para arrefecimento. Este consumo de energia é mínimo para a orientação Norte.
	Este	
	Sul	
	Oeste	

<b>Clima</b>	Helsínquia (Finlândia)	A aplicação de fachada do tipo Tampão resulta num menor consumo de energia, quando comparado com uma fachada envidraçada tradicional, no clima finlandês. Nos climas mais quentes, as FDP com melhores resultados são as do tipo Cortina de Ar Exterior.
	Porto (Portugal)	
	Atenas (Grécia)	
<b>Número de Fachadas Envidraçadas</b>	1 fachada	O aumento do número de fachadas envidraçadas resulta numa diminuição do consumo de energia para arrefecimento do espaço interior e num aumento das necessidades de aquecimento.
	4 fachadas	



# 6

## CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

### 6.1. CONCLUSÕES GERAIS

Após a discussão dos resultados, é agora possível extrair algumas conclusões gerais acerca do estudo realizado:

- As fachadas de dupla pele são elementos construtivo que foi aplicado pela primeira vez há mais de 100 anos e cuja evolução tem sido lenta e inconstante. Apesar da existência de casos de sucesso de edifícios equipados com FDP, a aceitação desta tipologia de fachada ainda é difícil nos dias de hoje, especialmente por esta significar um investimento inicial mais elevado em comparação com outras soluções semelhantes;
- Com o desenvolvimento de ferramentas de simulação numérica de edifícios, têm surgido estudos científicos na área das fachadas de dupla pele que demonstram que é possível obter uma poupança de energia efetiva através da aplicação de FDP em edifícios com variados tipos de ocupação e em diferentes climas. Deste modo, talvez seja tempo de se reavaliar a relação custo/benefício deste tipo de fachadas, não só a curto prazo, mas também tendo em vista o futuro e o preço crescente da energia;
- O elevado número de tipologias de fachada de dupla pele existentes (com diferentes combinações de tipo de ventilação, geometria e percurso do fluxo de ar na cavidade) fazem deste um elemento muito versátil e adequado ao conceito de “fachada inteligente”. As grelhas de admissão e exaustão de ar da fachada podem ser automatizadas de forma a possibilitar que o edifício responda da melhor forma possível às solicitações variáveis do ambiente exterior;
- O DesignBuilder é um *software* que permite realizar simulações em regime variável de edifícios com uma elevada complexidade. Como tal, é possível modelar e simular o comportamento de diferentes tipos de fachadas de dupla pele e avaliar o seu comportamento higratérmico através de simulações anuais. Apesar do programa possuir algumas limitações no que toca à definição de estratégias avançadas de controlo dos dispositivos de admissão e extração de ar, este tem um modo de simulação da ventilação natural bastante complexo (Airflow Network), que se adequou de forma satisfatória aos estudos que se pretendeu efetuar. A opção de executar simulações recorrendo ao módulo de Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD) e de realizar estudos paramétricos dentro do próprio programa também se revelaram uma mais-valia durante a realização desta dissertação;
- Através das simulações realizadas no DesignBuilder concluiu-se que num edifício localizado em Portugal com um nível de ganhos internos semelhante ao modelado, não existe uma vantagem concreta ao nível do consumo de energia para climatização na aplicação de uma

fachada de dupla pele na envolvente exterior. A adição de uma segunda camada de vidro faz com que seja mais difícil a dissipação de calor do espaço interior para o exterior, o que se traduz numa maior necessidade de arrefecimento da zona ocupada. Ainda assim, a tipologia que apresentou melhores resultados para a cidade do Porto foi a fachada Multi-Piso com o esquema de ventilação Cortina de Ar Exterior. Nesta fachada, a manutenção da temperatura da cavidade é conseguida através da combinação da admissão de ar exterior e do caudal de circulação de ar elevado que se estabelece na cavidade pelo facto de esta não possuir divisórias e de ter um elevado desenvolvimento em altura (que permite maximizar o efeito chaminé);

- Verificou-se que a alteração da espessura da cavidade de uma fachada de dupla pele tem um efeito variável na sua performance, conforme o percurso de fluxo de ar que esta apresente. Em fachadas não ventiladas, como as do tipo Tampão, o aumento da espessura da caixa de ar tem pouca influência na temperatura média do ar na cavidade e nas necessidades de arrefecimento do espaço interior. No caso de fachadas ventiladas, o aumento do espaçamento entre os dois panos da FDP conduz a um aumento do caudal de ventilação, o que se traduz numa diminuição da temperatura média do ar na cavidade e, consequentemente, da quantidade de energia necessária para climatização do espaço interior;
- O aumento da área das aberturas para ventilação da fachada de dupla pele traduz-se num aumento do fluxo de ar que atravessa a cavidade. Isto traz consequências distintas no caso de a fachada ser ventilada com ar exterior ou com ar interior. Em FDP ventiladas com recurso ao ar exterior (e.g. Cortina de Ar Exterior) o aumento do caudal de ventilação da cavidade traduz-se numa diminuição da temperatura do ar aí presente, o que se reflete no aumento da dissipação de calor através do envidraçado e, consequentemente, numa diminuição das necessidades de arrefecimento da zona interior. Nas fachadas ventiladas com ar proveniente do interior, o aumento da área das aberturas provoca um aumento das trocas de ar entre a fachada e a zona ocupada que, por sua vez, se traduz num aumento das necessidades de arrefecimento do espaço interior;
- Os estudos paramétricos feitos para diferentes combinações de envidraçados permitiram concluir que o tipo de vidro mais adequado a cada FDP varia consoante o esquema de ventilação a esta associado e, principalmente, com as condições do clima exterior. Na estação mais fria, a melhor solução para o envidraçado exterior é um vidro simples que permita uma maior dissipação de calor da cavidade para o exterior. Nos meses mais quentes, o principal objetivo é a redução dos ganhos solares através da fachada. Isto é conseguido através da utilização de vidros duplos coloridos em ambos os vãos envidraçados da FDP que são, dos tipos de vidro analisados, os que possuem um fator solar menor;
- Os ganhos internos devidos à iluminação artificial, equipamento de escritório e ocupação do edifício têm uma grande preponderância no balanço térmico anual do tipo de edifício simulado. Para além disto, os ganhos solares também contribuem para que o sistema AVAC funcione predominantemente para arrefecimento da zona ocupada durante todo o ano. As simulações feitas para o clima da cidade do Porto (Portugal) com diferentes níveis de ganhos internos demonstraram que as fachadas de dupla pele têm um comportamento mais interessante no caso de edifícios com um menor valor de ganhos internos. Isto acontece porque a introdução de um segundo pano de vidro na fachada de um edifício contribui para a diminuição das trocas de calor com o exterior e para um aumento da temperatura no seu interior, no caso de edifícios de escritório;
- As fachadas envidraçadas orientadas a Sul são aquelas na qual incide maior quantidade de radiação solar. Apesar de se conseguir uma redução significativa dos ganhos solares através da aplicação de uma fachada de dupla pele na envolvente exterior, os edifícios com fachadas



orientadas a Sul continuam a ser os que requerem uma maior quantidade de energia para arrefecimento do espaço interior. Por outro lado, as fachadas orientadas a Norte registam uma menor incidência de radiação solar, o que se traduz num menor consumo anual de energia para arrefecimento da zona ocupada;

- Quando analisados outros climas europeus, concluiu-se que as fachadas de dupla pele têm um comportamento bastante interessante em climas mais frios como o de Helsínquia (Finlândia), verificando-se uma diminuição efetiva da energia despendida para a climatização do edifício, quando comparada com uma fachada envidraçada tradicional. Neste tipo de ambiente, o esquema de ventilação mais interessante é o da fachada Tampão. A criação de uma caixa de ar hermética aliada à radiação solar incidente, fazem com que a temperatura do ar na cavidade aumente consideravelmente, o que conduz a uma diminuição das necessidades energéticas para o aquecimento do interior do edifício;
- A comparação entre modelos de edifícios com apenas uma fachada envidraçada e modelos com toda a envolvente exterior transparente permitiu concluir que quanto maior a percentagem de envolvente envidraçada, maiores as necessidades de aquecimento e menores as necessidades de arrefecimento, para os casos simulados. Existe também uma redução dos ganhos internos associados com a iluminação artificial e forte aumento dos ganhos solares;
- Em suma, as fachadas de dupla pele são elementos construtivos com uma grande potencialidade de melhorar o comportamento térmico nos edifícios, ao mesmo tempo que possibilitam uma poupança da energia despendida para a climatização. Porém, a sua elevada complexidade leva a que tenha de ser uma tecnologia projetada de uma forma bastante rigorosa, para que se consigam obter os resultados pretendidos com a sua aplicação. O desenvolvimento de uma FDP deve ter em conta o tipo de utilização do edifício (ganhos internos) e as características do clima em que este se encontra inserido, de modo a ser possível a escolha da tipologia que seja mais adequada e que conduza a uma diminuição das necessidades de climatização do edifício. Os programas de cálculo automático em regime variável como o DesignBuilder são uma ferramenta indispensável para o desenvolvimento deste tipo de fachadas, pois permitem a simulação de um enorme número de cenários de uma forma rápida e precisa.

## 6.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Na sequência do trabalho realizado na presente dissertação foram identificados certos tópicos que teria interesse estudar em publicações futuras:

- Comportamento de fachadas de dupla pele nos climas do Norte da Europa – uma das conclusões deste trabalho é que certas tipologias de FDP têm uma performance térmica muito interessante em países com climas mais frios (e.g. Finlândia). Como o impacto da implementação de uma fachada de dupla pele depende muito do local onde esta é instalada, seria curioso realizar mais simulações e tentar otimizar este elemento para os climas do Norte da Europa para testar qual é a máxima poupança de energia anual que é possível obter comparativamente com uma fachada com apenas um pano de vidro;
- Estratégias avançadas de ventilação de fachadas de dupla pele – a escolha da estratégia de ventilação da caixa de ar é fundamental para o bom funcionamento de uma FDP. O DesignBuilder não permite definir a abertura das grelhas de ventilação em função da temperatura exterior e da temperatura na zona ocupada simultaneamente. Um estudo nesta área com recurso a outro *software* de simulação que tivesse esta funcionalidade ou através da experimentação com um edifício real seria interessante e poderia ser a base para a criação de um manual de utilização de fachadas de dupla pele;

- Estudo pormenorizado de características do vidro na performance de uma fachada de dupla pele – na presente dissertação foi feito um estudo paramétrico para combinações de sete vidros numa semana de inverno e noutra de verão. Seria interessante aumentar o número de vidros estudados e expandir o período de simulação de modo a se obter uma análise mais global e pormenorizada;
- Aplicar o DesignBuilder a um caso de estudo real de um edifício em Portugal – na fase inicial do desenvolvimento desta dissertação, tentou-se entrar em contacto com algumas empresas responsáveis pela construção de edifícios com fachada de dupla pele na esperança de obter informações acerca do projeto e de fazer uma análise ao edifício com medições “in situ”. Tal não foi possível, mas é algo a ter em conta em estudos futuros como forma de pôr à prova a exatidão dos resultados do DesignBuilder;
- Utilização do ar da cavidade para a climatização do espaço interior – uma das referências bibliográficas estudadas no decorrer desta dissertação (Stec, Van Paassen, e Maziarz 2005) menciona a possibilidade do aproveitamento do ar existente na cavidade de uma fachada de dupla pele para aquecer a zona ocupada no caso de edifícios com um sistema coletivo de ventilação mecânica. Não é possível simular esta situação com recurso ao DesignBuilder, no entanto seria interessante analisar a poupança de energia efetivamente associada a esta estratégia com recurso a outro *software*.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Baldinelli, G. 2009. "Double skin façades for warm climate regions: Analysis of a solution with an integrated movable shading system". *Building and Environment* no. 44 (6):1107-1118. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132308001935>.
- Balkow, D. 1999. *Glass construction manual*. Birkhäuser.
- Ballestini, Giuseppe, Michele De Carli, Nicola Masiero e Giovanni Tombola. 2005. "Possibilities and limitations of natural ventilation in restored industrial archaeology buildings with a double-skin façade in Mediterranean climates". *Building and Environment* no. 40 (7):983-995. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S036013230400277X>.
- Barbosa, Sabrina Andrade, Túlio Márcio de Salles Tibúrcio, Joyce Correna Carlo e Ítalo Bruno Baleeiro Guimarães. 2013. "Método de utilização do programa Energyplus para verificação de desempenho térmico de ambientes com fachadas duplas". *Ambiente Construído* no. 13 (4):121-134.
- Batungbakal, Aireen. 2013. *The acoustic performance of double-skin facades: A design support tool for architects*.
- Bauer, Michael, Peter Möslle e Michael Schwarz. 2009. *Green building: guidebook for sustainable architecture*. Springer Science & Business Media.
- Brophy, Vivienne e J Owen Lewis. 2011. *A green vitruvius: principles and practice of sustainable architectural design*. Routledge.
- Bryan, Harvey. 1991. "Le Corbusier and the 'Mur Neutralisant: An Early Experiment in Double Envelope Construction". Comunicação apresentada em Proceedings of the Ninth International PLEA Conference.
- Chan, A. L. S. e T. T. Chow. 2014. "Calculation of overall thermal transfer value (OTTV) for commercial buildings constructed with naturally ventilated double skin façade in subtropical Hong Kong". *Energy and Buildings* no. 69 (0):14-21. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S03787778813006464>.
- Chou, S. K., K. J. Chua e J. C. Ho. 2009. "A study on the effects of double skin façades on the energy management in buildings". *Energy Conversion and Management* no. 50 (9):2275-2281. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890409001812>.
- CIBSE, Environmental Design. 1999. "CIBSE Guide A". *The Chartered Institution of Building Services Engineers, London*.
- Crosby, Brendan, Brian Ely, Jason Hickey, Lisa Hoang, Matthew Johnston, Steven Orlando, Jason Neves, James Saunders, Salvatore Valente e Edgar Veliz. 2008. *Office Building*. Northeastern University School of Architecture.
- DesignBuilder, Software Ltd. 2013. "DesignBuilder Software Help v3.4 - Introducing DesignBuilder". Acedido a 16/03/2015. <http://www.designbuilder.co.uk/helpv3.4/index.htm>.
- Ding, Wenting e Yuji Hasemi. 2006. "Smoke Control Using A Double-skin Facade". *Fire Safety Science* no. 8:1327-1337. <http://www.iafss.org/publications/fss/8/1327/view>.
- Ding, Wenting, Yuji Hasemi e Tokiyoshi Yamada. 2005. "Natural ventilation performance of a double-skin façade with a solar chimney". *Energy and Buildings* no. 37 (4):411-418. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S03787778804002452>.

- DOE, Department Of Energy. 2014. "Energyplus engineering reference". *The Reference to EnergyPlus Calculations*.
- DOE, US Department Of Energy. 2008. "Building Technologies Office: EnergyPlus Energy Simulation Software". Acedido a 04/03/2015. <http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/>.
- ECBCS, Energy Conservation in Buildings and Community Systems e Aalborg University (Denmark) AAU. 2008. "Annex 44 - Integrating Environmentally Responsive Elements in Buildings".
- Goethe Institut. 2014. "Steiff-Spielzeugfabrik in Giengen - Gläserne Ikone der Moderne". Acedido a 15/03/2015. <https://www.goethe.de/de/kul/arc/20430390.html>.
- Gomes, Maria da Glória de Almeida e António Heleno Domingues Moret Rodrigues. 2010. *Comportamento térmico de fachadas de dupla pele: modelação numérica e análise experimental*. Lisboa: UTL, Instituto Superior Técnico.
- Gratia, Elisabeth e André De Herde. 2007. "Greenhouse effect in double-skin facade". *Energy and Buildings* no. 39 (2):199-211. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778806001836>.
- Hamza, Neveen. 2008. "Double versus single skin facades in hot arid areas". *Energy and Buildings* no. 40 (3):240-248. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778807000758>.
- Hult, Erin L, Gianluca Iaccarino e Martin Fischer. 2012. "Using CFD Simulations to Improve the Modeling of Window Discharge Coefficients". *SimBuild, Madison*.
- IES, Illuminating Engineering Society of North America. 2000. *Lighting Handbook: Reference & application*. Illuminating Engineering.
- Inflation Data. 2015. "Historical Oil Prices: InflationData.com". Acedido a 01/04/2015. [http://inflationdata.com/Inflation/Inflation\\_Rate/Historical\\_Oil\\_Prices\\_Table.asp](http://inflationdata.com/Inflation/Inflation_Rate/Historical_Oil_Prices_Table.asp).
- Ji, Y., M. Cook, V. Hanby, D. Infield, D. Loveday e L. Mei. 2007. "Cfd modelling of double-skin façades with venetian blinds". Comunicação apresentada em IBPSA 2007 - International Building Performance Simulation Association 2007.
- Jiang, Wei, Krishnan Gowri, Michael D Lane, Brian A Thornton, Michael I Rosenberg e Bing Liu. 2009. "Technical Support Document: 50% Energy Savings Design Technology Packages for Highway Lodging Buildings". *Pacific Northwest National Laboratory*.
- Kim, Deuk-Woo e Cheol-Soo Park. 2011. "Difficulties and limitations in performance simulation of a double skin façade with EnergyPlus". *Energy and Buildings* no. 43 (12):3635-3645. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778811004403>.
- Kim, Gon, Laura Schaefer e Jeong Tai Kim. 2012. "Development of a double-skin façade for sustainable renovation of old residential buildings". *Indoor and Built Environment*:1420326X12469533.
- Lee, Eleanor, Stephen Selkowitz, Vladimir Bazjanac, Vorapat Inkarojrit e Christian Kohler. 2002. "High-performance commercial building facades". *Lawrence Berkeley National Laboratory*.
- Loncour, X, A Deneyer, M Blasco, G Flamant e P Wouters. 2004. "Ventilated double facades". *Belgian Building Research Institute, Department of Building Physics, Indoor Climate and Building Services*.
- Marion, William e Stephen Wilcox. 1995. "Solar radiation data manual for buildings". *National Renewable Energy Lab., Golden, CO (United States)*.

- Mingotti, N., T. Chenvidyakarn e A. W. Woods. 2013. "Combined impacts of climate and wall insulation on the energy benefit of an extra layer of glazing in the facade". *Energy and Buildings* no. 58 (0):237-249. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778812006470>.
- MSF Engenharia S.A. 2015. "Natura Towers - Tem Vida Própria". Acedido a 05/03/2015. <http://naturatowers.msf-turim.pt/>.
- Oesterle, Eberhard, Rolf-Dieter Lieb e Peter Green. 2001. *Double-skin facades: integrated planning: building physics, construction, aerophysics, air-conditioning, economic viability*. Prestel.
- Poirazis, Harris. 2004. *Double Skin Facades for Office Buildings-Literature Review Report*. Division of Energy and Building Design Department of Construction and Architecture - Lund Institute of Technology.
- Radhi, Hassan, Stephen Sharples e Fayze Fikiry. 2013. "Will multi-facade systems reduce cooling energy in fully glazed buildings? A scoping study of UAE buildings". *Energy and Buildings* no. 56 (0):179-188. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778812004343>.
- RGEU, Regulamento Geral das Edificações Urbanas. 1951. "RGSPDADAR (1995). Decreto Regulamentar nº 23/95, de 23 de Agosto-Regulamento Geral Dos Sistemas Públicos E Prediais De Distribuição De Água E De Drenagem De Águas Residuais. Silva-Afonso, A.(1992)". *Dimensionamento de condutas elevatórias em sistemas de abastecimento de água-aspectos económicos*:52-54.
- Saelens, Dirk, Jan Carmeliet e Hugo Hens. 2002. "Energy performance assessment of multiple-skin facades". *HVAC&R Research* no. 9 (2):167-185.
- Silva, Tiago José, Bruno Alexandre Pereira e Fernando Marques da Silva. 2009. Fachada Dupla Pele Para Clima do Sul da Europa. Em *VII Congresso de Construção Metálica e Mista*.
- Simões, Fausto. 2008. "Introdução à Arquitectura Bioclimática". Acedido a 15/04/2015. <http://arquitecologia.org/Descs/CliFautl0.htm>.
- Single Aspect. 2004. "Sustaining Tower Blocks". Acedido a 20/04/2015. <http://singleaspect.org.uk/sustower/SOA-present.htm>.
- Stec, W. J., A. H. C. Van Paassen e A. Maziarz. 2005. "Modelling the double skin façade with plants". *Energy and Buildings* no. 37 (5):419-427. <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-13244265763&partnerID=40&md5=007780b8430adaf2522e193022f7b817>.
- Streicher, W. 2005. "BESTFAÇADE – Best Practice for Double Skin Façades EIE".
- Uuttu, Sini. 2001. "Study of current structures in double-skin facades", MSc thesis in Structural Engineering and Building Physics. Department of Civil and Environmental Engineering, Helsinki University of Technology (HUT), Finland. <http://www.hut.fi/Units/Civil/Steel/SINI2.pdf>









## **ANEXOS**

**A1 – MAPA DE SIMULAÇÕES**

**A2 – DADOS DE SAÍDA DO DESIGNBUILDER**



A1 – Mapa de todas as simulações executadas com o DesignBuilder

Simulação	Geometria										Fluxo				Espessura			Área de Greijas				EP		Ganhos Internos				Orientação			Clima		NFE
	Caso Base		Confinada	Corredor	Chaminé	Multi-Piso	Tp	CAE	CAI	AA	EA	25 cm	50 cm	100 cm	2,5%	5,0%	10%	20%	Vidro	0%	50%	100%	Norte	Este	Sul	Oeste	Helsinqia	Porto	Atenas				
00	X																					X	X	X	X		X	X	X				
01		X					X								X							X	X	X	X		X	X	X				
02		X						X							X							X	X	X	X		X	X	X				
03			X						X						X							X	X	X	X		X	X	X				
04			X							X					X							X	X	X	X		X	X	X				
05			X				X				X				X							X	X	X	X		X	X	X				
06												X			X							X	X	X	X		X	X	X				
07				X											X							X	X	X	X		X	X	X				
08				X					X						X							X	X	X	X		X	X	X				
09			X							X					X							X	X	X	X		X	X	X				
10				X							X				X							X	X	X	X		X	X	X				
11					X							X			X							X	X	X	X		X	X	X				
12				X					X			X			X							X	X	X	X		X	X	X				
13				X						X		X			X							X	X	X	X		X	X	X				
14				X						X		X			X							X	X	X	X		X	X	X				
15				X							X				X							X	X	X	X		X	X	X				
16					X							X			X							X	X	X	X		X	X	X				
17					X				X			X			X							X	X	X	X		X	X	X				
18				X						X		X			X							X	X	X	X		X	X	X				
19				X							X				X							X	X	X	X		X	X	X				
20					X						X				X							X	X	X	X		X	X	X				
21						X						X										X	X	X	X		X	X	X				
22				X									X									X	X	X	X		X	X	X				
23							X					X										X	X	X	X		X	X	X				
24				X					X			X										X	X	X	X		X	X	X				
25				X						X			X									X	X	X	X		X	X	X				
26				X					X				X									X	X	X	X		X	X	X				
27				X						X		X										X	X	X	X		X	X	X				
28					X					X		X										X	X	X	X		X	X	X				
29				X						X		X										X	X	X	X		X	X	X				
30				X					X			X										X	X	X	X		X	X	X				
31				X				X					X		X							X	X	X	X		X	X	X				
32				X					X				X				X					X	X	X	X		X	X	X				
33				X					X				X					X				X	X	X	X		X	X	X				
34				X						X			X		X							X	X	X	X		X	X	X				
35				X					X			X			X							X	X	X	X		X	X	X				
36				X					X			X			X			X				X	X	X	X		X	X	X				
37	X																	X				X	X	X	X		X	X	X				
38	X																			X		X	X	X	X		X	X	X				
39			X					X						X								X	X	X	X		X	X	X				
40			X					X						X								X	X	X	X		X	X	X				
41				X					X					X			X					X	X	X	X		X	X	X				
42				X					X					X								X	X	X	X		X	X	X				
43				X						X				X								X	X	X	X		X	X	X				
44				X							X			X								X	X	X	X		X	X	X				
45	X														X							X	X	X	X		X	X	X				
46	X																					X	X	X	X		X	X	X				
47	X																					X	X	X	X		X	X	X				
48				X					X				X		X							X	X	X	X		X	X	X				
49				X					X				X		X							X	X	X	X		X	X	X				
50				X					X				X		X							X	X	X	X		X	X	X				
51				X				X					X		X							X	X	X	X		X	X	X				
52				X					X				X		X							X	X	X	X		X	X	X				
53				X					X				X		X							X	X	X	X		X	X	X				
54				X						X			X		X							X	X	X	X		X	X	X				
55				X						X			X		X							X	X	X	X		X	X	X				
56				X						X			X		X							X	X	X	X		X	X	X				

Simulação	Geometria				Fluxo				Espessura				Área de Grelhas				EP		Ganhos Internos				Orientação				Clima		NFE			
	Caso Base	Confinada	Corredor	Chaminé	Multi-Piso	Tp	CAE	CAI	AA	EA	25 cm	50 cm	100 cm	2,5%	5,0%	10%	20%	Vidro	0%	50%	100%	Norte	Este	Sul	Oeste	Helsínquia	Porto	Atenas	1	4		
57	X														X						X									X		
58		X																			X									X		
59			X				X						X			X					X						X			X		
60			X					X					X			X					X						X			X		
61			X					X					X			X					X						X			X		
62			X					X					X			X					X						X			X		
63			X					X					X			X					X						X			X		
64				X					X				X			X					X						X			X		
65		X											X			X					X						X			X		
66					X		X						X			X					X						X			X		
67					X			X					X			X					X						X			X		
68				X				X					X			X					X						X			X		
Legenda																																
Tp-Tampão; CAE-Cortina de Ar Exterior; CAI-Cortina de Ar Interior; AA-Admissão de Ar; EA-Exaustão de Ar; NFE-Número de fachadas enviaçadas; EP-Estudo Paramétrico																																

## A2 – Dados de saída das simulações anuais no DesignBuilder

Simulação	Simulação Anual				
	Aquecimento	Arrefecimento	Envidraçado	Ganhos Solares	Ventilação Cavidade
	(kWh)	(kWh)	(kWh)	(kWh)	(m <sup>3</sup> /s)
00	218,268	-15733,902	-15511	8456	N/A
01	1,804	-29505,560	-1518	4420	0,000
02	45,480	-22358,683	-7977	4431	0,836
03	48,095	-34659,670	-2183	4030	0,672
04	62,058	-26084,700	-2594	4119	0,268
05	68,045	-25392,860	-453	4581	0,280
06	1,428	-29787,700	-4844	5828	0,000
07	22,990	-24206,580	-10420	5805	0,793
08	25,735	-33153,200	-3473	5455	0,619
09	38,593	-26596,030	-5140	5523	0,175
10	38,516	-26577,320	-3691	5869	0,185
11	27,022	-29331,870	-2279	4622	0,000
12	79,023	-22655,467	-4190	4811	2,186
13	37,586	-35866,220	-2109	4251	0,717
14	57,678	-29620,920	-5019	4573	0,190
15	72,332	-25632,792	-3218	4830	0,197
16	6,720	-28283,390	-602	5967	0,000
17	46,214	-20680,076	-8809	6021	2,585
18	71,585	-34088,680	-1026	5705	0,935
19	87,766	-29043,030	-2096	5783	0,192
20	87,235	-24149,010	-819	5949	0,192
21	0,030	-30589,930	-2623	2544	0,000
22	0,028	-31201,980	-2457	1532	0,000
23	25,414	-25143,120	-9618	2526	0,787
24	26,616	-26017,880	-9116	1172	0,759
25	6,245	-34975,750	-2729	2119	0,573
26	0,438	-36650,860	-2198	755	0,538
27	26,974	-27098,810	-3904	2135	0,174
28	21,744	-27457,660	-3362	803	0,173
29	26,560	-27196,810	-3992	2511	0,183
30	24,070	-27246,750	-3896	1293	0,183
31	18,681	-24928,840	-9858	5818	0,509
32	27,980	-23518,570	-10870	5782	1,378
33	31,737	-22883,980	-10944	5724	2,339
34	19,432	-32298,850	-3864	5784	0,343
35	28,378	-33557,220	-2928	4687	1,019
36	34,507	-33886,000	-1855	3192	1,633
37	3312,186	-2065,413	-9531	8482	N/A
38	597,935	-8864,315	-12277	8482	N/A
39	523,944	-9851,010	-1579	5828	0,000
40	66,626	-18376,660	-3155	5829	0,000
41	1297,659	-5868,605	-6052	5807	0,758
42	227,531	-13615,480	-7963	5807	0,774
43	1048,209	-11835,450	-1654	5457	0,609
44	208,576	-20218,010	-2467	5457	0,612

Simulação	Simulação Anual				
	Aquecimento	Arrefecimento	Envidraçado	Ganhos Solares	Ventilação Cavidade
	(kWh)	(kWh)	(kWh)	(kWh)	(m <sup>3</sup> /s)
45	290,267	-14296,687	-17639	3151	N/A
46	266,593	-15397,386	-15824	5109	N/A
47	253,108	-15465,092	-15829	5876	N/A
48	34,880	-21267,511	-10882	624	0,000
49	17,921	-25803,330	-7300	2991	0,000
50	16,325	-26309,410	-7199	3388	0,000
51	58,254	-19381,458	-12312	617	0,655
52	45,156	-21859,446	-10927	2902	0,751
53	44,572	-22324,135	-10836	3282	0,714
54	141,176	-19637,583	-6535	584	0,555
55	83,179	-26870,669	-4650	2673	0,562
56	82,906	-27878,799	-4494	3006	0,577
57	3971,827	-9674,307	-24920	7058	N/A
58	216,667	-19645,207	-10424	8674	N/A
59	940,389	-7539,197	-13018	2845	0,000
60	23,100	-32528,230	-1727	5439	0,000
61	1531,427	-17728,943	-18075	2825	0,798
62	38,669	-27602,190	-6564	5419	0,780
63	2328,579	-20984,303	-7922	2569	0,629
64	45,900	-37635,330	-1647	5076	0,611
65	3147,502	-10238,348	-44207	41989	N/A
66	631,150	-28658,142	-16211	5959	0,000
67	1450,054	-16663,995	-26467	5809	2,506
68	10693,903	-73225,590	-8092	6035	0,751